



# METSÄTEOLLISUUDEN LIETTEIDEN BIOKAASUTUS BIOJÄTTEEN KANSSA

Biokaasupanoskokeiden ja jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston avulla

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Anna Kaivola			
Työn nimi Metsäteollisuuden lietteiden biokaasutus biojätteen kanssa			
Päiväys	15.5.2013	Sivumäärä/Liitteet	57/2
Ohjaaja(t) Yliopettaja Merja Tolvanen & projekti-insinööri Maarit Janhunen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu, Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikkö, Kuopio			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyö liittyy Savonia-ammattikorkeakoulun, Itä-Suomen yliopiston ja saksalaisen Ostfalia University of Applied Sciencesin yhteiseen METLI-hankkeeseen, jossa on tavoitteena luoda kokonaisvaltainen palvelukonsepti metsäteollisuuden lietteille. Opinnäytetyö koostuu kahdesta osasta: teoriaosassa on kerrottu millaisia metsäteollisuuden lietteet ovat, miten niitä käsitellään ja millaista on niiden hyötykäyttö nykyisin. Lisäksi on kuvattu hankkeessa mukana olevien kohdelaitosten toimintaa. Opinnäytetyössä käsitellään myös uudistunutta jätelainsäädäntöä, erilliskerätyn biojätteen ominaisuuksia sekä yleisesti biokaasuprosessia ja sen optimiolosuhteita.</p> <p>Työn kokeellinen osuus käsitti laboratoriomittakaavan biokaasukokeita kahden massa- ja paperitehtaan jätevedenpuhdistamojen primääri- ja biolietteilte. Työssä tutkittiin lietteiden metaanintuottopotentiaaleja mesofiilillä lämpötila-alueella sekä biokaasupanoskokeiden että jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston avulla. Lisäksi panoskokeissa tutkittiin erilliskerätyn biojätteen vaikutusta metaanintuottopotentiaaliin, kun sitä käsitellään anaerobisesti yhdessä metsäteollisuuden lietteiden kanssa.</p> <p>Jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston toiminnassa koettiin monia vastoinkäymisiä, eikä kokeesta saatu luotettavien tuloksia. Reaktoreita kuormitettiin luultavasti aluksi liian voimakkaasti, minkä seurauksena haihtuvia rasvahappoja muodostui paljon ja reaktoreiden pH-arvot laskivat voimakkaasti. Myös syötteiden puskurikyky oli heikko ja niiden sisältämä rikki muodosti prosessissa vapautuvien vetyionien kanssa rikkivetyä, jolla on biokaasutusta inhiboiva vaikutus.</p> <p>Biokaasupanoskokeiden tuloksena saatiin selville, että biojätteen lisäys nosti merkittävästi metaanintuottopotentiaalia. Pelkästään metsäteollisuuden lietettä sisältävien pullojen tuottopotentiaali oli noin 270 - 470 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS, kun taas biojätettä sisältävin pullojen metaanintuottopotentiaali oli noin 540 - 560 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS.</p>			
<p>Avainsanat</p> <p>metsäteollisuus, jätevesiliete, biokaasu, anaerobinen hajoaminen, biojäte</p>			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Anna Kaivola			
Title of Thesis Biogasification of Sludges from Forest Industry with Organic Waste			
Date	15 May 2013	Pages/Appendices	57/2
Supervisor(s) Mrs Merja Tolvanen, Principal Lecturer & Ms Maarit Janhunen, Project Engineer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Science, Kuopio			
<p>Abstract</p> <p>This thesis is part of a co-operative METLI project with Savonia University of Applied Science, University of Eastern Finland and Ostfalia University of Applied Science. The aim of the METLI project is to create a service concept to sludges from forest industry.</p> <p>First literature was studied to find out what kind of treatment and utilization methods are used to sludges from forest industry nowadays and how the new waste legislation will affect these methods. In addition, features of organic waste as well as biogas production were studied from literature. Secondly, the experimental part included laboratory scale biogas experiments to primary and biosludges from wastewater treatment plants of two pulp and paper mills. Within the experiments methane production potentials together with biogas batch experiments were researched as well as the continuous biogas reactor in the mesophilic temperature scale. The biogas batch experiments also included a research on how separated organic waste affects the methane production potential when it is processed with sludges from forest industry anaerobically.</p> <p>During the operation with the continuous biogas reactor there were a number of disruptions so no reliable results were obtained. In the beginning of the experiment the reactors were probably overloaded which caused overforming of evaporating fatty acids and decreasing of the pH of the reactors. The buffering ability of the inputs was also weak and they included a lot of hydrogen sulphide which has an inhibitory effect on biogasification.</p> <p>The results of the biogas batch experiments revealed that the increasing quantity of organic waste raised methane production potentials significantly. The batches that included only sludges from forest industry had a producing potential of about 270 to 470 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS, whereas the batches that included also organic waste had a potential of around 540 to 560 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tVS.</p>			
<p>Keywords</p> <p>forest industry, wastewater sludge, biogas, anaerobic digestion, organic waste</p>			

## ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikölle kevään 2013 aikana. Haluan kiittää koko yksikön henkilökuntaa työn aikana saamastani avusta ja kannustuksesta.

Erityisesti haluan kiittää projekti-insinööri Maarit Janhusta työni ohjauksesta ja tärkeistä neuvoista, joita sain projektin tavoitteiden mukaisen lopputuloksen saavuttamiseen. Lisäksi tahdon kiittää koulun taholta työtäni ohjannutta yliopettaja Merja Tolvasta koko opiskelujeni aikaisesta kannustuksesta ja laadukkaasta opetuksesta.

Kuopiossa 15.5.2013

Anna Kaivola

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	8
1.1	Tarkoitus ja tavoitteet .....	8
1.2	Työn sisältö .....	8
2	TYÖN TAUSTA.....	9
3	METSÄTEOLLISUUDEN LIETTEET.....	10
3.1	Jätevesilietteiden synty ja ominaisuudet .....	10
3.2	Lietteiden käsittelyn ja hyötykäytön nykytila Suomessa .....	12
3.2.1	Mekaaniset käsittelymenetelmät.....	14
3.2.2	Termiset käsittelymenetelmät .....	15
3.2.3	Biologiset käsittelymenetelmät .....	16
3.2.4	Kemialliset käsittelymenetelmät .....	17
3.2.5	Lietteiden hyötykäyttö .....	18
4	ERILLISKERÄTTY BIOJÄTE JA SEN SOVELTUVUUS BIOKAASUTUTKIMUKSEEN.....	20
5	JÄTELAINSÄÄDÄNTÖ .....	22
5.1	EU:n jätedirektiivi 2008/98/EY .....	22
5.2	Jätelaki 646/2011 .....	23
5.3	Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 179/2012 .....	24
6	KOHDELAITOSTEN KUVAUS .....	26
6.1	Kartonkitehdas, Tehdas A.....	26
6.1.1	Kuvaus yrityksestä .....	26
6.1.2	Tuotantoprosessin kuvaus .....	26
6.1.3	Jätevesien käsittely .....	28
6.2	Integroitu sellutehdas, Tehdas B.....	30
6.2.1	Kuvaus yrityksestä .....	30
6.2.2	Tuotantoprosessin kuvaus .....	30
6.2.3	Jätevesien käsittely .....	31
6.3	Jätekukko Oy.....	33
7	JÄTEVESILIETTEIDEN BIOKAASUPROSESSI JA SEN HYÖDYNTÄMINEN .....	35
7.1	Biokaasuprosessin vaiheet .....	35
7.2	Biokaasuprosessin optimiolosuhteet .....	36

7.2.1	Lämpötila .....	36
7.2.2	pH ja alkaliteetti.....	36
7.2.3	Ravinteet.....	37
7.2.4	Viipymä ja orgaaninen kuormitus .....	37
7.2.5	Sekoitus .....	38
7.3	Hajoamista hidastavat tekijät.....	38
8	LABORATORIOKOKKEET .....	40
8.1	Laboratoriokokeiden lähtökohdat ja suunnittelu .....	40
8.2	Kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuuksien määrittäminen .....	41
8.3	Biokaasupanoskokeet.....	41
8.4	Jatkuvatoiminen biokaasulaitteisto .....	43
8.4.1	Kooreaktori.....	44
8.4.2	Kooreaktorin toiminta ja alkutoimenpiteet.....	44
8.4.3	Prosessin ylläpito .....	44
8.4.4	Prosessin tilan seuranta .....	45
9	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	50
9.1	Kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet.....	50
9.2	Biokaasupanoskokeiden tulokset .....	50
9.3	Jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston tulokset .....	52
10	YHTEENVETO.....	54

## LÄHTEET

## LIITTEET

Liite 1 Taulukko biokaasupanoskokeiden syötemääristä

Liite 2 Taulukko jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston syötemääristä

## LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

AOX (Adsorbable Organic Halides)= Adsorboituva orgaaninen halogeeniyhdiste

ECF (Elementary Chlorine Free) = Hienopaperin valkaisumenetelmä, jossa valkaisuun käytetään klooridioksidia yhdessä happikaasun kanssa.

Happidelignifiointi = Happivalkaisu on sellun valmistusprosessin vaihe, jossa massan ligniinipitoisuutta pienennetään happikaasun ( $O_2$ ) avulla alkalisisessa ympäristössä.

HRT (Hydraulic Retention Time) = Hydraulinen viipymä

LOI (Loss Of Ignition) = Hehkutushäviö

NSSC-prosessi (Neutral Sulphite Semi Chemical) = Puolikemiallinen neutraali sulfiittiprosessi

OLR (Organic Loading Rate) = Orgaaninen kuormitus

TOC (Total Organic Carbon) = Kokonaisorgaaninen hiili

TS (Total Solids) = Kuiva-aine

VS (Volatile Solids) = Orgaaninen kuiva-aine

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tarkoitus ja tavoitteet

Opinnäytetyö liittyy Savonia-ammattikorkeakoulun ja Itä-Suomen yliopiston yhteiseen "METLI-Palveluliiketoimintaa metsäteollisuuden lietteistä" -hankkeeseen, jossa on tavoitteena luoda kokonaisvaltainen palvelukonsepti metsäteollisuuden lietteiden käsittelyyn. Vuonna 2016 astuu voimaan kaatopaikkadirektiivi, jonka perusteella metsäteollisuuden yritysten tulee kehittää lietteille sellaista käsittelyä, että ne voidaan hyödyntää joko materiaalina tai energiana.

Opinnäytetyössä on tarkoitus vertailla kahden massa- ja paperitehtaan jätevesien puhdistuksen yhteydessä muodostuvien primääri- ja biolietteiden kaasuntuottavuuksia. Työ tehdään sekä biokaasupanoskokeina että jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston avulla, ja siinä pilotoidaan erilaisten lietteiden ja niistä tehtävien syöteseosten kaasuntuottoa, kaasun koostumusta sekä prosessien stabiiliutta. Lisäksi tutkitaan kuinka paljon metaanintuottopotentiali kasvaa, kun metsäteollisuuden lietteiden kanssa käsitellään anaerobisissa olosuhteissa biojätettä.

Työn tavoitteena on saada selville metsäteollisuus lietteiden kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet sekä muodostuneen kaasun määrät ja koostumukset, joiden avulla voidaan laskea metaanintuottopotentialit.

## 1.2 Työn sisältö

Opinnäytetyö koostuu kirjallisuustutkimuksesta ja kokeellisesta osuudesta, joista ensimmäinen sisältää selvityksen METLI-hankkeesta ja kohdelaitosten esittelyn, jonka jälkeen käsitellään metsäteollisuuden lietteiden ominaisuuksia sekä niiden käsittelyn ja hyötykäytön nykytilaa Suomessa. Oma kappaleensa on myös erilliskerätystä biojätteestä, sen ominaisuuksista ja syntymääristä Suomessa. Lisäksi kirjallisuustutkimukseen on otettu mukaan uudistunut jätelainsäädäntö, jolla on ollut suuri merkitys koko opinnäytetyön tekoon sekä perehtyminen biokaasuprosessiin ja sen hyödyntämiseen lietteiden käsittelyssä.

Varsinainen kokeellinen osuus käsittää laboratoriokokeiden lähtökohdat ja selvityksen koejärjestelyistä sekä kuvauksen päivittäisistä toimenpiteistä niin biokaasupanoskokeiden kuin jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston parissa. Tämän jälkeen esitetään saadut tulokset ja vertaillaan niitä aikaisempiin tutkimuksiin sekä löytyvään lähdeaineistoon.



## 2 TYÖN TAUSTA

METLI-hanke on Savonia-ammattikorkeakoulun, Itä-Suomen yliopiston ja saksalaisen Ostfalia University of Applied Sciencesin yhteinen projekti, jossa pyritään luomaan kokonaisvaltainen palvelukonsepti metsäteollisuuden lietteille. Projektin tavoitteena on luoda mahdollisuudet metsäteollisuuden lietteiden käsittelemiseksi uuden kiristyneen lainsäädännön edellyttämällä tavalla ja yhdistää tarvittavat toimijat, jotta palvelukonsepti toteutuu kustannustehokkaasti.

Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikön vastuulla on tehdä kokeellista tutkimusta liittyen eri lietteiden ja niistä tehtävien syöteseosten kaasun koostumukseen ja biokaasuntuottopotentiaaliin sekä prosessin stabiiliuteen ja käsittelyjännöksen ominaisuuksiin. Tämä toteutetaan laboratoriomittakaavassa hyödyntäen sekä biokaasupanoskokeita että jatkuva-toimista biokaasulaitteistoa. Lisäksi Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksiköllä on käytössä pilot-mittakaavan siirrettävä biokaasulaitos, jossa tullaan toteuttamaan biokaasuprosessin koeajoja tehdaskohteessa vuoden 2013 aikana.

Itä-Suomen yliopiston osuutena hankkeessa on kartoittaa tämän hetkiset metsäteollisuuden lietteiden käsittelyn toimintatavat sekä määrittää kokonaispotentiaali eli metsäteollisuuden tuottamat massat, niiden energiapotentiaali sekä muut lietteiden ominaisuudet, joilla on vaikutusta palveluliiketoiminnan kehitystyöhön. Itä-Suomen yliopiston tehtäväkenttään kuuluu myös biokaasuprosessin monitorointi ja tehokkaan mitta-analytiikan kehittäminen sekä energiataseiden arviointi.

Saksalaisen Ostfalia-ammattikorkeakoulun tutkimuksen pääpaino on HTC-prosessin (Hydro Thermal Carbonization) testauksessa ja soveltuvuuden arvioinnissa metsäteollisuuden lietteiden käsittelemiseksi. Jätevesilietteiden käsittelyssä HTC-prosessin avulla saadaan lopputuotteena hiilipitoisia pellettejä, joita voidaan hyödyntää suoraan energiana tai vaihtoehtoisesti maanparannuskäytössä. Projektissa tutkitaan myös mahdollisuudet biokaasuprosessin ja HTC-prosessin yhdistämiselle. Tällöin biokaasuprosessista jäävä käsittelyjäännös johdettaisiin jälkikäsittelyyn HTC-prosessiin ja puolestaan HTC-prosessin tuottama rejektivesi hyödynnettäisiin biokaasuprosessin syötteenä.

Hankkeen käytännön kohteina on integroitu sellutehdas ja fluting kartonkitehdas, joista käytetään yritysten toivomusten mukaisesti nimityksiä Tehdas A ja Tehdas B. Lisäksi mukana on Jätekuikko Oy, jolta tutkimuksiin on saatu erilliskerättyä biojätettä.

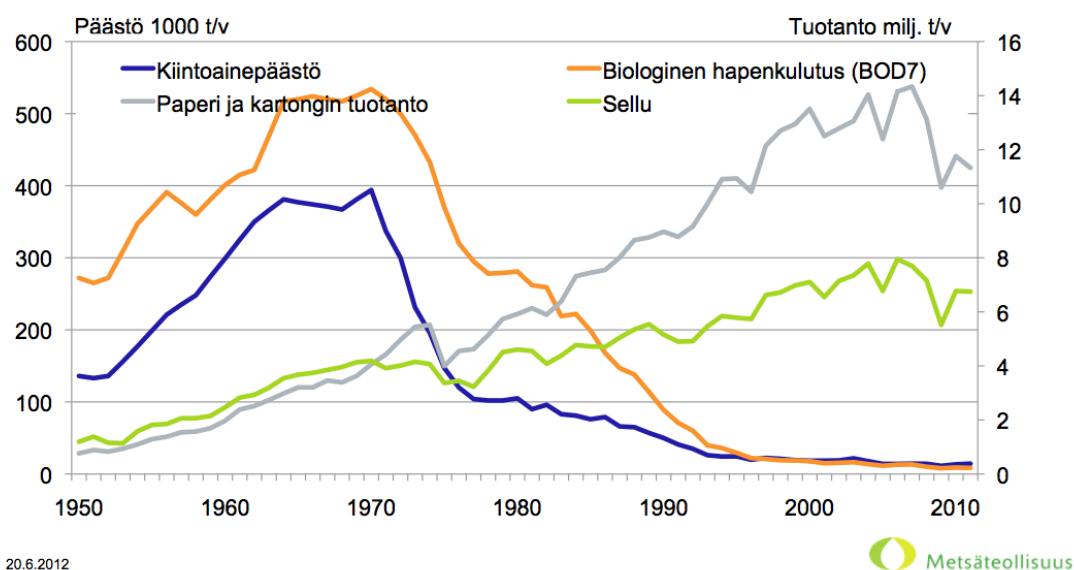
### 3 METSÄTEOLLISUUDEN LIETTEET

#### 3.1 Jätevesilietteiden synty ja ominaisuudet

Vuonna 2011 Suomessa valmistettiin yhteensä 11,3 miljoonaa tonnia paperia ja kartonkia. Hienopaperin vuosituotanto oli noin 2,6 miljoonaa tonnia ja kartongin 2,7 miljoonaa tonnia, jonka lisäksi sellua tuotettiin 6,7 miljoonaa tonnia. Jätevesipäästöjä syntyi samaisena vuonna 34,59 m<sup>3</sup>/tuotantotoni. (Metsäteollisuus ry 2013.)

Kuviossa 1 on esitetty tuotannon ja jätevesikuormituksen arvoja vuosina 1950 - 2011. Kuvioista huomaa, että 1970-luvulta lähtien biologista hapenkulutusta ja kiintoainepäästöjä on saatu merkittävästi vähennettyä samaan aikaan, kun paperin ja kartongin tuotanto on kolminkertaistunut ja sellun tuotanto lähes kaksinkertaistunut.

Suomen massa- ja paperiteollisuuden tuotanto ja jätevesikuormitus 1950-2011



Kuvio 1 Suomen massa- ja paperiteollisuuden tuotanto ja jätevesikuormitus 1950 – 2011 (Metsäteollisuus ry)

Metsäteollisuuden jätevesien puhdistuksessa hyödynnetään nykyään monesti aktiivilietemenetelmää, josta muodostuu pääasiassa kahdenlaista lietettä: esiselkeytyksessä syntyvää primääri- eli kuituliettä ja biologisesta käsittelystä muodostuvaa sekundääri- eli bioliettä. Jätevedenpuhdistusta voidaan tehostaa vielä kemiallisella saostuksella, esimerkiksi syöttämällä alumiinisulfaattia ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) flotaatioyksikköön, jolloin muodostuu vielä kemiallista lietettä.

Primääriliettä muodostuu siis biologisen jäteveden puhdistuksen esiselkeytyksessä, kun vettä raskaammat hiukkaset laskeutuvat altaan pohjalle. Primääriliete koostuu pääosin kuiduista ja kuoresta, jotka taas koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä, sekä epäorgaanisesta osasta. Kuitu-

jen osuus lietteestä voi vaihdella välillä 40 - 65 % ja tuhkapitoisuus saattaa korkeimmillaan olla jopa 60 %. Sellutehtaiden lietteen tuhkapitoisuus on yleensä vain 3 - 20 %, kun taas hienopaperitehtaiden lietteen tuhkapitoisuus nousee 50 - 60 %:iin. Primäärilietteen hiili-typpisuhde (C:N) vaihtelee välillä 32 - 930:1. Paperi- ja kartonkiteollisuudessa sekä sellutehtaissa primäärilietettä muodostuu noin 1,5 - 2 % tuotannon määrästä kuiva-aineena laskettuna. (Lohiniva 2001, 24.)

Biolietettä muodostuu aktiivilietelaitoksen jälkiselkeytyksessä, ja se koostuu pääosin mikrobimassasta sekä kuolleesta soluaineksesta. Bioliete sisältää ligniiniä 30 - 70 % ja loppuosa koostuu pääosin proteiineista, rasvoista ja hiilihydraateista. Taulukossa 1 on esitetty metsäteollisuuden lietteiden tyyppillisiä koostumuksia. Taulukosta huomataan, että suurimmat erot primääri- ja biolietteen välillä ovat tuhkan ja kuitujen määrässä sekä C:N suhteessa. Kemiallista sellua valmistettaessa biolietettä syntyy keskimäärin 10 - 20 kg/t lopputuotetta kohti, mekaanista massaa valmistettaessa 8 - 15 kg/t lopputuotetta kohti ja paperituotteita valmistettaessa 1 - 5 kg/t. (Moring 2012, 18.)

Taulukko 1 Metsäteollisuuden lietteiden tyyppillisiä koostumuksia (Ojanen 2001)

Ominaisuus	Primääriliete	Bioliete
Tuhka (%)	5 - 60	15 - 20
Kuidut (%)	40 - 65	-
Hiili (%)	25 - 45	45 - 47
Vety (%)	3 - 5,5	5,4 - 6,5
Happi (%)	15 - 35	25 - 35
Typpi (%)	1,2 - 4,5	1,5 - 4,7
Rikki (%)	< 0,5	1,2 - 3,8
Natrium (%)	-	0,4 - 1,6
Fosfori (%)	< 0,1	0,3 - 0,8
C/N -suhde	32 - 930:1	6 - 115:1
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)	12 - 19	15,5 - 18,5

Edellä mainittujen lietteiden lisäksi tehtaalla voi syntyä myös kuorilietettä, mikäli kuorimo toimii märkäkuorintamenetelmällä, hiekanerottimen hiekkalietettä ja siistauslietettä, kun paperitehdas käyttää kierrätysmassaa. Siistausprosessissa jät-paperista poistetaan painovärit, täyteaineet, liimat ja päällysteet, jolloin jäljelle jää uusiokuitu. Siistausliete koostuu pääosin tuhkaista sekä kuidusta, ja se sisältää myös jonkin verran painoväreistä peräisin olevia raskasmetalleja, kuten kuparia, kromia ja nikkeliä. Lisäksi paperitehtailla muodostuu tuotantoprosessissa pastalietettä. (Ojanen 2001, 10; Lohiniva 2001, 25.)

Metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamon aktiivilieteprosessissa käytetään hyödyksi mikrobeja, jotka hajottavat jätevedessä olevaa orgaanista ainesta. Näiden hyödyllisten mikrobien lisäksi jätevedessä ja puhdistuksen yhteydessä muodostuvissa lietteissä voi esiintyä tauteja aiheuttavia mikrobeja, kuten legionella- ja ympäristömykobakteereja. Jätevedenpuhdistamolla suurimmat riskikohteet ovat il-

mastusaltaat ja jäähdystornit, joista mikrobit voivat levitä aerosolien mukana jopa useiden satojen metrien päähän. Lisäksi lietteen käsittelytiloissa, kuten suotonauha- ja ruuvipuristimilla, työntekijät voivat altistua suurille mikrobi- ja endotoksiinipitoisuuksille. (Kallio 2010, 21.)

Legionellabakteerit kuuluvat gram-negatiivisiin bakteereihin ja niitä tunnetaan yli 50 eri lajia, joista tärkein taudinaiheuttaja on *L. pneumophila*. Legionellabakteereja esiintyy luonnossa pieninä pitoisuuksina vesissä ja maaperässä. Bakteerit suosivat kosteita ja lämpimiä (20 - 45 °C) elinympäristöjä, minkä takia niitä voi esiintyä erilaisissa prosessi- ja jätevesissä. Gram-negatiivisten bakteereiden solulinjassa on lisäksi endotoksiinia, joten työntekijä voi altistua korkeille endotoksiinipitoisuuksille. Legionellatartunta aiheuttaa keuhkokuumeen, ns. legioonalaistaudin sekä flunssan kaltaista Pontiac-kuumetta. (Torvinen, 6.)

Ympäristömykobakteerit ovat tavallisia ympäristöstä peräisin olevia bakteereja, joita tunnetaan jo yli 120 eri lajia. Mykobakteerit viihtyvät kosteissa olosuhteissa ja niille soveltuva kasvulämpötila on 10-52 °C. Mykobakteerit aiheuttavat tuberkuloosin kaltaista keuhkosairautta, pehmytkudos-, iho- ja imusolmukeinfektioita, mutta sairastumisriski on pieni terveillä aikuisilla. (Torvinen, 7.)

### 3.2 Lietteiden käsittelyn ja hyötykäytön nykytila Suomessa

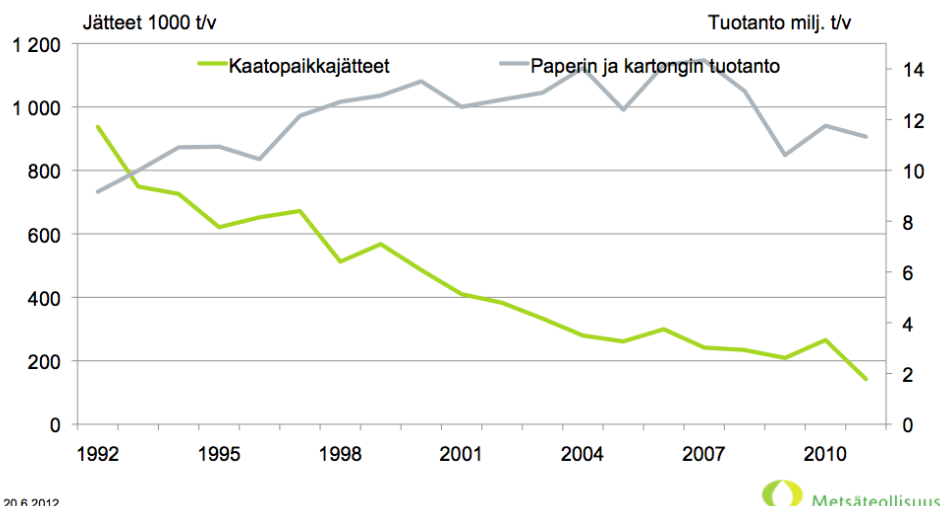
Metsäteollisuuden lietteiden käsittelymenetelmän valintaa ja hyötykäyttöön vaikuttaa syntyvän lietteen ominaisuudet, erityisesti lietteen kuiva-ainepitoisuus. Perinteisesti sellu- ja paperitehtailla muodostuvan lietteen hyötykäyttötapa on ollut mekaanisen vedenerotuksen jälkeen polttaa liete kattilassa yhdessä kuoren, hakkeen ja purun kanssa, sekä läjittää osa lietteistä tehtaiden omille kaatopaikoille. Lietteiden poltto edellyttää kuitenkin riittävän korkeaa kuiva-ainepitoisuutta, mikä vaikeutuu, jos biolietteiden suhteellinen osuus lietteiden kokonaismäärästä kasvaa. Samoin kaatopaikkasijoitusta pyritään merkittävästi vähentämään uudistuneen jätelainsäädännön avulla. (Ojanen 2001, 7; Moring 2012, 21.)

Seuraavaan taulukkoon (Taulukko 2) on koottu metsäteollisuuden lietteiden hyötykäyttökohteet vuosina 2009 ja 2010:

Taulukko 2 Suomen metsäteollisuuslietteiden käyttökohteet kuivina lietetonneina vuosina 2009 ja 2010 (Moring, 2012)

<b>Liete</b>	<b>Käyttökohde</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
<b>Kuitu- ja pasta lietteet (t)</b>	Maanrakennus	34 000	30 000
	Muu materiaalikäyttö	13 000	-
	Energiakäyttö	25 000	10 000
	Kaatopaikka / muu loppusijoitus	4 000	8 000
	<b>Yhteensä</b>	<b>76 000</b>	<b>48 000</b>
<b>Bio- ja sekalietteet (t)</b>	Maanrakennus	39 000	39 000
	Kompostointi	35 000	20 000
	Lannoitus	-	16 000
	Muu materiaalikäyttö	3 000	3 000
	Energiakäyttö	232 000	272 000
	Kaatopaikka / muu loppusijoitus	40 000	67 000
	<b>Yhteensä</b>	<b>349 000</b>	<b>417 000</b>

Taulukosta huomataan, että lietteiden hyödyntäminen energiana on edelleen suosituinta, varsinkin jäteveden puhdistamon bio- ja sekalietteistä yli 60 % energiahyötykäytetään. Osa metsäteollisuuden lietteistä käytetään kuitenkin hyväksi maanrakennuksessa tai muussa materiaalikäytössä. Varsinkin kaatopaikkajätteiden osalta kehitys on ollut myönteistä, vaikka taulukossa kaatopaikkasijoitus on väliaikaisesti noussut. Vuonna 2011 kaatopaikoille sijoitettiin yhteensä 142 400 tonnia jätettä kuiva-aineena, josta soodasakka ja meesajäte muodostivat lähes puolet. Kuitu- ja pastalietteitä sijoitettiin yhteensä 4 200 tonnia ja jätevedenpuhdistamon lietteitä 33 300 tonnia kuiva-aineena. Kuviosta 2 huomataan, että kaatopaikkajätteiden määrä on pudonnut lähes 90 % vuodesta 1992 lähtien, vaikka paperin ja kartongin tuotanto on kasvanut. (Metsäteollisuus ry, Ympäristötilastot 2011.)



Kuvio 2 Metsäteollisuuden kaatopaikkajätteet sekä paperin ja kartongin tuotannon kehitys vuosina 1992 - 2011 (Metsäteollisuus ry)

### 3.2.1 Mekaaniset käsittelymenetelmät

Metsäteollisuuden yleisimmät mekaaniset kuivauslaitteet ovat suotonauhapuristin, ruuvipuristin ja linko. Suotonauhapuristimessa lietteiden suodatus tapahtuu painovoiman sekä puristustelojen aiheuttamien puristus- ja leikkausvoimien avulla. Ennen suotonauhapuristinta liete on hyvä käsitellä kemikaaleilla, jotta hienojakoinen kiintoaines flokkuloituu isompirakeiseksi. Suotonauhapuristimella päästään keskimäärin noin 35 % kuiva-ainepitoisuuteen, mutta biolietteen kohdalla savutetaan vain 10 - 20 %:n kuiva-ainepitoisuus. (Ojanen 2001, 18 - 20; Lohiniva 2001, 54.) Tämän takia mekaaninen vedenerotus vaikeutuu jätevedenpuhdistamon lietteiden osalta, jos biolietteen suhteellinen osuus koko lietemäärästä kasvaa.

Ruuvipuristimen vedenerotus perustuu rei'itetyn sylinterin sisällä kiertyvään ruuviin, jonka aiheuttama paine puristaa lietettä seinämiä vasten veden suotautuessa reikälevyn läpi. Ruuvipuristimen tehokkuutta voidaan parantaa lietteiden kemikaali- ja höyrykäsittelyllä, jolloin kuiva-ainepitoisuus voi nousta jopa yli 50 %:iin. Parhaiten ruuvipuristin soveltuu lietteille, joiden biolietteen osuus on alle 40 %, ja se onkin yleistynyt metsäteollisuudessa sillä saavutettavissa olevan korkean kuiva-ainepitoisuuden takia. (Ojanen 2001, 20; Lohiniva 2001, 56.)

Linkous on keskipakovoimaan perustuva vedenerotusmenetelmä, jolloin kiintoaines painuu pohjalle nesteen jäädessä yläpuolelle. Linkouksen etuina on täysin suljettu rakenne, jolloin ilmaan ei pääse vapautumaan aerosoleja kuivauksen aikana. Linkojen käyttö on kuitenkin vähentynyt sillä saatavan vain 10 - 35 %:n kuiva-ainepitoisuuksien takia. (Ojanen 2001, 21; Lohiniva 2001, 53.)

### 3.2.2 Termiset käsittelymenetelmät

#### Terminen kuivaus

Termistä kuivausta käytetään yleensä mekaanisen kuivauksen jälkeen, kun halutaan nostaa lietteen kuiva-ainepitoisuutta polttoa varten. Termisessä kuivauksessa lietteestä poistetaan vettä haihduttamalla, jolloin käytetään joko kontakti- tai konvektiokuivaimia. Kontaktikuivaimissa liete on suoraan kosketuksissa kuumiin kaasuihin, jolloin yleisimmät kuivaintyypit ovat pyörivä rumpukuivain ja leijupetikuivain. Konvektiokuivaimissa lämpö siirretään epäsuorasti kuivattavaan lietteeseen. Vaihtoehtoina ovat muun muassa ruuvikuivurit tai kupliva- ja kiertoleijupetikuivaimet. (Ojanen 2001, 22 - 23.)

Termisillä kuivaimilla voi päästä jopa yli 90 %:n kuiva-ainepitoisuuteen, jolloin lietteiden poltt ominaisuuden paranevat huomattavasti. Lisäksi termisellä kuivauksella saadaan tuhottua haitalliset bakteerit, kuten legionellabakteerit. (Moring 2012, 27.)

#### Poltto

Yleisin lietteiden käyttökohde Suomessa on edelleen poltto tehtaan omassa kattilassa, jolloin poltosta saatava energia voidaan hyödyntää tuotantoprosessissa ja kaatopaikoille sijoitettavan lietteen määrä vähenee. Metsäteollisuuden lietteet poltetaan yleensä kuorikattilassa yhdessä kuoren ja hakkeen kanssa, joiden lisäksi mukana käytetään usein turvetta, jolloin lietteiden osuus polttoaineesta on yleensä vain 5 - 10 %. Tehokkaan polton edellytyksenä on riittävä lietteen kuiva-ainepitoisuus, vähintään 30 - 50 %, ja kuiva-aineen lämpöarvo, noin 8 - 14 MJ/kg. (Ojanen 2001, 36.)

Kuorikattiloissa käytetään yleensä menetelmänä leijukerros polttoa, joka soveltuu paremmin lietteen ja muiden biomassojen polttoon kuin perinteinen arinapoltto. Leijukerros poltossa kattilan pohjalla olevaa hiekkakerrosta eli petiä leijutetaan alhaalta puhallettavan ilman avulla. Tämän lisäksi pedin päällä olevaan polttoaineeseen syötetään ylhäältä päin sekundääri-ilmaa, joka huolehtii tehokkaasta palamisesta. Kosteat ja tuhkapitoiset lietteet heikentävät palamistuloksia, jolloin kattilan lämpötilan säätäminen on tarkkaa. Lämpötila ei saa nousta liian korkeaksi, muuten tuhka pehmenee ja sulaa. (Ojanen 2001, 36; Moring 2012, 31.)

Primääri- ja biolietteen yhteiskäsittely voi olla haastavaa biolietteen osuuden kasvaessa, jolloin kyseisten lietteiden erilliskäsittely on vartenotettava vaihtoehto. Esimerkkinä tästä on biolietteen poltto soodakattilassa. Tätä varten bioliete tulee kuivata mekaanisesti esimerkiksi lingolla ja sekoittaa mustalipeän joukkoon ennen haihduttamovaihetta. (Lohiniva 2001, 77.)

### 3.2.3 Biologiset käsittelymenetelmät

#### Anaerobinen käsittely

Biokaasuprosessi voi toimia joko märkä- tai kuivaprosessina, joista märkäprosessi on yleisimmin käytetty menetelmä. Tällöin lietteen kuiva-ainepitoisuus saa olla korkeintaan 15 %, kun taas kuivaprosessissa kuiva-ainepitoisuus on noin 20 - 40 %. (Pöry Environment 2007, 19.)

Käsiteltäessä puhdistamolietteitä anaerobisesti lietteen kuiva-ainepitoisuutta nostetaan sakeuttamalla se joko gravitaatiitiivistimellä tai mekaanisella tiivistimellä. Tällöin lietteen syöttösakeus saadaan nostettua ja lietemäärä pienenee, jolloin samalla reaktorilavuudella saadaan viipymää pidennettyä. Tämä parantaa kaasuntuottoa ja samalla säästetään lämmityskuluissa, kun ei lämmitetä ylimääräistä vettä. (Pöry Environment 2007, 19; Latvala 2011, 23.)

Varsinainen prosessi tapahtuu hapettomissa olosuhteissa suljetussa reaktorissa, joko mesofiilisella (37 °C) tai termofiilisella (55 °C) lämpötila-alueella. Anaerobisessa käsittelyssä muodostuu mikrobi-toiminnan seurauksena biokaasua, joka sisältää noin 55 - 75 % metaania (CH<sub>4</sub>), 25 - 45 % hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>), sekä pieniä määriä happea (O<sub>2</sub>), ammoniakkia (NH<sub>3</sub>) ja rikkivetyä (H<sub>2</sub>S). Lisäksi biokaasu sisältää kosteutta sekä havaittavissa määrin hiukkasia, metyyliimerkaptaania (CH<sub>3</sub>SH), dimetyylisulfidia (CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub>), fluoria (F) sekä klooria (Cl). Muodostuva metaani voidaan hyödyntää esimerkiksi polttoaineena tai sähkön ja lämmön tuotannossa.

Biokaasuprosessissa muodostuu myös käsittelyjäännöstä, joka kuivataan yleensä mekaanisesti esimerkiksi lingolla tai suotonauhapuristimella, jolloin kuivausta voidaan tehostaa lisäämällä lietteen sekaan polymeeriä. Termisesti käsitelty ja mekaanisesti kuivattua lietettä voi käyttää suoraan maanparannusaineena, mutta mesofiilisesti käsitelty liete tulee vielä stabiloida esimerkiksi kompostoimalla, termisellä kuivauksella tai kalkkistabiloinnilla. Anaerobinen hajotus tuottaa biokaasusta energiaa ja samalla parantaa ravinteiden kierrätystä, mikäli käsittelyjäännöstä käytetään lannoitteena maataloudessa. Samalla se tuhoaa patogeenejä ja vähentää jatkokäsittelyn hajuhaittoja. (Pöry Environment 2007, 20.)

Metsäteollisuuden lietteiden anaerobinen käsittely voi kuitenkin olla vaikeaa sen suuren ligniinipitoisuuden vuoksi, koska ligniini on anaerobisesti heikosti hajoavaa. Tutkimuksissa on havaittu, että primäärilietteen käsittelyssä on saatu tuotettua 80 - 370 m<sup>3</sup> metaania lietteen kuiva-ainetonnin kohden. Biolietteen käsittelyssä biokaasuntuotto on ollut puolestaan yli 400 m<sup>3</sup> kuivaa lietetonnin kohti. (Moring 2012, 37.)

Luvussa 7 ”Jätevesilietteiden biokaasuprosessi ja sen hyödyntäminen ” on kerrottu tarkemmin biokaasuprosessin vaiheista ja optimiolosuhteista.



### Kompostointi

Kompostointi on aerobinen prosessi, jossa hapellisissa oloissa elävät mikrobit hajottavat hiiltä, vetyä ja happea sisältäviä yhdisteitä hiilidioksidiksi ja vedeksi sekä humukseksi. Aerobinen prosessi tuottaa paljon energiaa, joka käytetään prosessin lämmitykseen ja solusynteesiin. (Lohiniva 2001, 44.)

Laitosmainen kompostointi voidaan jakaa esikäsittely- ja kompostointivaiheeseen sekä loppukäsittelyyn. Esikäsittely riippuu pitkälti siitä millaista materiaalia käsitellään, jolloin materiaali murskataan ja seulotaan tarvittaessa sopivaan palakokoon, epäpuhtaudet poistetaan ja materiaali sekoitetaan hyvin, jotta siitä tulisi kompostoinnin kannalta riittävän homogeenistä. Esikäsittelyn tärkein tehtävä on saada aikaan ilmava rakenne ja säätää kompostimassan kosteus sopivaksi. Lietteiden käsittelyssä kuiva-ainepitoisuuden tulisi olla yli 15 %, jotta kompostointi olisi kannattavaa eikä tukiaineita tarvitsisi lisätä kompostimassan joukkoon. (Pöry Environment 2007, 15.)

Varsinainen kompostointi käsittää reaktorissa tapahtuvan esikompostoinnin ja aumoissa tehtävän jälkikompostoinnin. Esikompostointiin on olemassa useampia laitosratkaisuja, joista yleisimmät Suomessa ovat tunneli- ja rumpukompostointi. Esikompostivaiheessa kompostimassaa ilmastetaan ja sekoitetaan, jolloin pyritään saamaan kompostimassasta tarpeeksi tasalaatuista ja hygieenistä. Reaktoreissa saadaan luotua kompostoitumiselle optimaaliset olosuhteet, jolloin esikompostointi kestää yleensä 2 - 4 viikkoa. (Pöry Environment 2007, 15; Lehto 2001, 5.)

Jälkikompostointi tapahtuu yleensä ulkona aumoissa, joissa kompostimassaa kypsytetään edelleen, jotta myös hitaasti hajoavat yhdisteet muuttuvat humukseksi. Kompostoitumisen jälkeen kompostimassasta poistetaan seulomalla mahdolliset tukiaineet ja lisätään joukkoon esimerkiksi hiekkaa mulan valmistamiseksi. Kompostoitu liete voidaan käyttää sellaisenaan esimerkiksi kaatopaikkojen maisemoinnissa tai viherrakentamisessa. (Pöry Environment 2007, 16; Lehto 2001, 5.)

Kompostoinnin haittapuolina ovat hajuhaitat, jätevedet ja kompostien kääntelystä johtuva pölyäminen. Kompostoitumisesta muodostuvat kaasut koostuvat pääosin hiilidioksidista, mutta sisältävät myös haisevia yhdisteitä, kuten ammoniakkia ja rikkiyhdisteitä. Jätevesipäästöjä muodostuu kompostimassan kastelusta reaktorissa sekä aumojen valumavesistä. (Pöry Environment 2007, 16.)

#### 3.2.4 Kemialliset käsittelymenetelmät

Kalkkistabilointi on yksi kemiallinen lietteen käsittelymenetelmä, jossa lietteen pH-arvo nostetaan yli 11:een kalkin avulla 14 päivän ajaksi. Tällöin lietteen mikrobiologinen hajotustoiminta päättyy ja liete sadaan hygienisoitua. Kalkkistabiloitu liete soveltuu sellaisenaan lannoitteeksi esimerkiksi maatalouteen sekä viherrakentamiseen. Käsittelyn haittapuolina on kuitenkin se, että kemikaalikustannukset ovat korkeat ja lietteen määrä kasvaa käsittelyn yhteydessä, mikä nostaa myös kuljetuskustannuksia. Tämän takia kalkkistabilointia käytetään vain pienillä jätevedenpuhdistamoilla. (Pöry Environment 2007, 36; Lohiniva 2001, 40.)

Toinen kemiallinen käsittelymenetelmä on ns. Kemicond-käsittely, jossa rikkihapolla käsitelty liete hapetetaan vetyperoksidilla. Happamissa olosuhteissa lietteen sisältämät rautafosfaatit ja -hydroksidit liukenevat sekä lietteen geelimäinen rakenne hajoaa vapauttaen samalla vettä. Hapetuksessa ferrirauta saostaa fosfaatti-ionit ferrifosfaattina ja lietteestä vapautuu edelleen vettä, jolloin lietteen kuiva-ainepitoisuus kasvaa keskimäärin 10 % verrattuna käsittelemättömään lietteeseen. Hapetuksen jälkeen liete neutraloidaan natriumhydroksidilla ja kuivataan mekaanisesti esimerkiksi suotonauha- tai ruuvipuristimella. Kemicond-käsitelty liete vaatii edelleen jatkokäsittelyn, esimerkiksi aumakompostoinnin. (Pöyry Environment 2007, 33.)

Menetelmän etuina on kuiva-ainepitoisuuden kasvu, hajuhaittojen väheneminen ja lietteen hygienisoituminen. Käsittely vaatii kuitenkin monien kemikaalien käyttöä, mikä nostaa kustannuksia ja voi aiheuttaa työturvallisuusriskin. (Pöyry Environment 2007, 34.)

### 3.2.5 Lietteiden hyötykäyttö

Metsäteollisuuden lietteet sopivat moniin hyötykäyttökohteisiin lietteiden ominaisuuksista riippuen. Vaihtoehtoisia hyötykäyttökohteita ovat muun muassa maa- ja viherrakentaminen, maisemointi sekä maa- ja metsätalouden lannoitekäyttö. Parhaiten näihin käyttötarkoituksiin sopii kompostoitu liete, jonka hyödyntämiselle maanparannusaineena tai lannoitteena pätee Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista (1784/14/2011) sekä sen muutoksesta annettu asetus (1034/14/2012). Näissä asetuksissa on annettu raja-arvoja raskasmetallipitoisuuksille sekä velvoite ilmoittaa tuotteen ravinnepitoisuudet ja tärkeimmät ominaisuudet, kuten happamuus, johtokyky, kosteus ja orgaaninen aines. Lisäksi asetuksissa rajoitetaan taudinaiheuttajien ja muiden mikrobien esiintymistä lietteissä. (Moring 2012, 45.) Taulukossa 3 on esitetty asetuksen 1034/14/2012 antamat raja-arvot jätevesilietteiden käytölle maataloudessa.

Taulukko 3 Lietteen suurimmat sallitut haitallisten metallien pitoisuudet sekä lietteen käytöstä aiheutuvan vuotuisen haitallisten metallien kuormitus maanviljelyksessä (MMM:n asetus 1034/14/2012)

<b>Alkuaine</b>	<b>Enimmäispitoisuus mg/kg kuiva- ainetta</b>	<b>Enimmäispitoisuus g/ha vuodessa</b>
Elohopea	0,2	1
Kadmium	0,5	1,5
Kromi	200	300
Kupari	100	600*
Lyijy	60	100
Nikkeli	60	100
Sinkki	150	1500*

\* Kuparin ja sinkin kuormitukset saavat olla korkeintaan kaksinkertaiset, mikäli niistä on puutetta maaperässä, johon lannoitevalmistetta ollaan käyttämässä.

Lietteiden lannoitekäytön etuina on ravinteiden kierrätys, jolloin teollisesti valmistettujen lannoitteiden tarve vähenee. Metsäteollisuuden lietteet toimivat hyvin lannoitteena, mikäli niiden kompostointiaika on ollut riittävän pitkä ja lietteen joukkoon on lisätty tyyppä lannoitteen tavoitearvojen täyttymiseksi. Esimerkiksi sellutehtaan kuitu- ja biolietettä voidaan käyttää metsälannoitteena happamien maiden neutralointiin ja kalkitukseen, jolloin liete parantaa samalla maaperän tiheyttä ja vedenpitävyyttä. (Moring 2012, 44.)

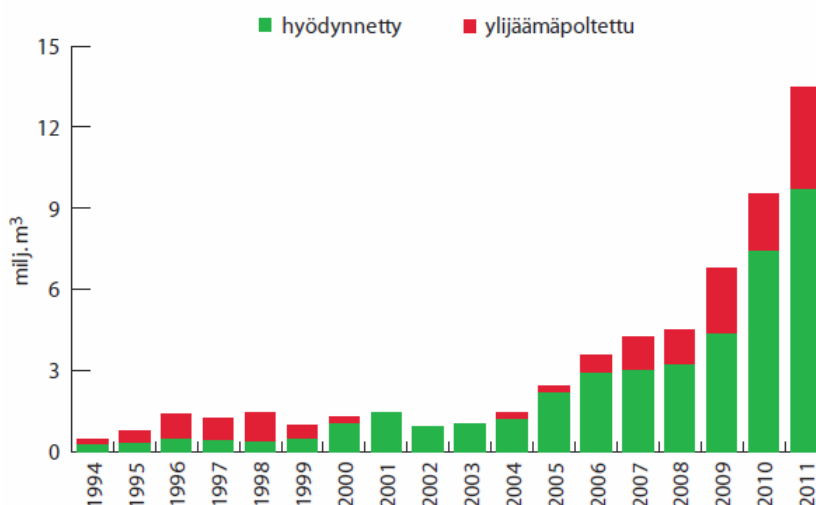
Maisemointiin ja viherrakentamiseen käytettävälle lietteelle ei ole asetettu yhtä tiukkoja kriteerejä kuin lannoitekäyttöön soveltuvalla lietteellä. Metsäteollisuuden lietteitä voidaan käyttää esimerkiksi kaatopaikkarakenteissa ja pintakerrosten maisemoinnissa. Kaatopaikkarakenteissa käytetään yleisesti savea, joka voidaan korvata esimerkiksi paperiteollisuuden lietteillä, joilla on samanlaiset tiivisysominaisuudet kuin puristetulla savella. Tämän lisäksi metsäteollisuuden lietteen sisältämä kuituinen orgaaninen aines vähentää päällysteen halkeilua. Lietteiden käyttöä kaatopaikkarakenteissa ohjataan yleensä tavanomaisen ja pysyvän jätteen kaatopaikkojen raja-arvojen perusteella. (Moring 2012, 43.)

Kaatopaikkarakenteiden sijaan metsäteollisuuden lietteitä voidaan käyttää myös tierakentamisessa, esimerkiksi päällysteissä, rakennekerroksissa, pengerryksissä sekä pakkaseristyksissä ja meluvalleissa. Tällöin tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa koostumus, rasituksen kesto, vedenpitävyys tai -läpäisevyys sekä turvallisuus ympäristön kannalta. (Ojanen 2001, 51.)

#### 4 ERILLISKERÄTTY BIOJÄTE JA SEN SOVELTUVUUS BIOKAASUTUTKIMUKSEEN

Erilliskerätty biojäte on kotitalouksista, julkisista toimitiloista (päiväkodit, koulut, virastot, terveydenhoito), teollisuudesta, kaupoista ja yrityksistä peräisin olevaa syntypaikkalajiteltua biojätettä. Vuonna 2011 yhdyskuntien biojätettä erilliskerättiin yhteensä hieman yli 360 000 tonnia, josta yli 91 % kierrätettiin materiaalina. Energia hyötykäyttöön biojätteestä meni noin 25 000 tonnia eli 7 % ja loppusijoitukseen vain 5 000 tonnia eli 2 %. (Tilastokeskus, Jätetilasto 2011)

Valtaosa biojätteestä kierrätetään kompostoimalla, joko rumpu-, tunneli- tai aumakompostointina. Biojätteen anaerobinen käsittely on kuitenkin lisääntymään päin, kun uusia yhteiskäsittelylaitoksia rakennetaan Suomeen. Yhteiskäsittelylaitos tarkoittaa, että laitoksella hyödynnetään monia eri raaka-aineita, esimerkiksi erilliskerättyä biojätettä, karjanlantaa sekä puhdistamoliettteitä. Alla olevasta kuvista 3 huomataan, että viimeisen kymmenen vuoden aikana yhteiskäsittelylaitosten tuottama biokaasun määrä on kasvanut merkittävästi. Vuonna 2011 yhteiskäsittelylaitosten biokaasun tuotanto oli 13,45 milj. m<sup>3</sup>, jossa metaanipitoisuus oli keskimäärin 56 - 70 %. Sähköä sillä saatiin tuotettua 14 GWh ja lämpöä 40,6 GWh. Tämän lisäksi kaikkiaan 19 uutta yhteiskäsittelylaitosta on rakenteilla tai suunnitteilla eri paikkakunnille. (Huttunen 2012, 27 - 29.)



Kuvio 3 Yhteiskäsittelylaitosten tuottama biokaasu ja sen hyödyntäminen vuosina 1994 - 2011 (Huttunen 2012, 27.)

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän (HSY) ja Ramboll Finland Oy:n vuonna 2010 toteuttama Pääkaupunkiseudun biojätteen koostumus -selvitys osoitti, että biojätteen laatu vaihtelee eri asuinkiinteistöjen ja palvelutoimialueiden välillä sekä eri vuoden aikojen välillä. Selvityksessä oli tarkasteltavana kerrostalokiinteistöt, rivi- ja paritalokiinteistöt, sairaalat, koulut, päivittäistavarakaupat sekä ravintolat. Lajittelututkimuksessa saatiin selville, että eri ryhmistä kerätty biojätteet sisälsivät pääosin ruokajätettä ja ruoan valmistuksen jätettä sekä kompostoituvaa paperia ja pahvia. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut 2011, 24.)

Merkittävin ero oli puutarhajätteen osuus asuinkiinteistöjen biojätteen joukossa, jossa sitä oli keskimäärin 15 - 35 % jätemääristä. Tällä on merkitystä biojätteen ominaisuuksiin, koska puutarhajäte nostaa biojätteen kuiva-ainepitoisuutta ja laskee typpipitoisuutta, jolloin myös biojätteen metaanintuottopotentiaali pienenee. Tutkimuksessa biojätteen kuiva-ainepitoisuus vaihteli välillä 25 - 37 %, typpipitoisuus 14 - 28 g/kg ja forforipitoisuus 1,8 - 2,8 g/kg. (Helsingin seuden ympäristöpalvelut 2011, 38 - 39.)

Myös VTT:n selvityksessä ”Yhdyskuntajätteiden hyödyntäminen biojalostamossa” on tutkittu biojätteen koostumusta. Tutkimuksessa saatiin selville, että biojätteen kokonaishiilihydraattipitoisuus oli lähes 50 % kuiva-aineesta, ja noin 40 % hiilihydraateista oli tärkkelystä. (Rättö 2009, 34.)

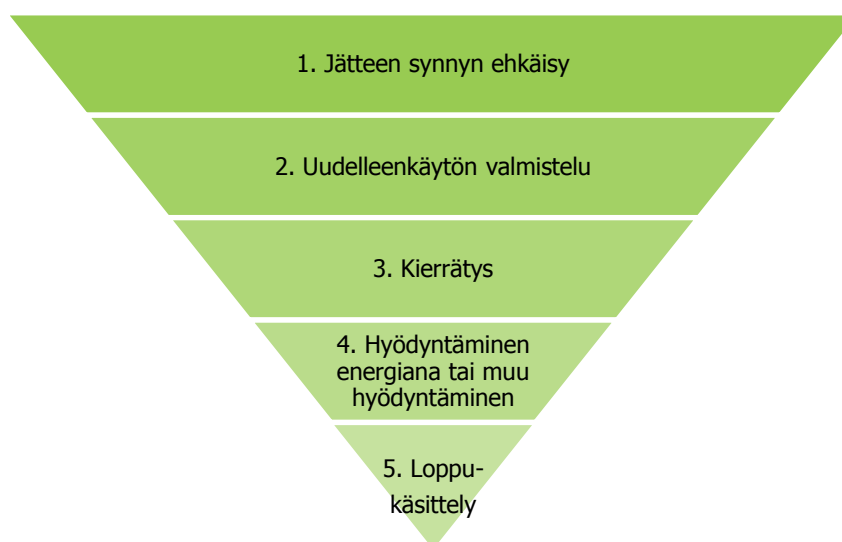
Erilliskerätyn biojätteen anaerobinen käsittely voi olla haastavaa jätteen heterogeenisen koostumuksen takia. Tämä tuo haasteita jätteen esikäsittelylle ja anaerobisen prosessin hallinnalle, minkä takia Suomessa biojätteen käsittely yhdessä karjanlannan tai puhdistamolietteiden kanssa on kannattavaa.

## 5 JÄTELAINSÄÄDÄNTÖ

Uusi jätelaki (646/2011) sekä siihen liittyvät uudet lait ja tärkeimmät asetukset tulivat voimaan 1.5.2012. Keskeisimmät asetukset ovat valtioneuvoston asetus jätteistä (179/2012) sekä ympäristönsuojeluasetuksen muutos (180/2012). Lisäksi lukuisat muut jätealan säädökset on tarkoitus uudistaa vuosina 2013–2014. (Ympäristöministeriö 2012b.)

### 5.1 EU:n jätedirektiivi 2008/98/EY

Euroopan unionin uusi jätedirektiivi asetettiin voimaan 19.11.2008 ja sen keskeisimpänä sisältönä on säätää sellaisia toimenpiteitä, joilla suojellaan ympäristöä ja ihmisten terveyttä vähentämällä jätteen syntymisestä aiheutuvia haittavaikutuksia sekä parantamalla jätteen kierrätyksen ja hyötykäytön tehokkuutta. Direktiivillä saatettiin voimaan viisiportainen jätehierarkia, joka sitoo kaikkia jäsenmaita noudattamaan jätteiden käsittelyssä kuvion 4 mukaista tärkeysjärjestystä.



Kuvio 4 Jätehierarkia (Ympäristöministeriö 2012a)

Tässä jätteen synnyn ehkäisyllä tarkoitetaan kaikkia niitä toimenpiteitä, joilla vähennetään jätteen määrää, mukaan lukien tuotteiden uudelleenkäyttö tai niiden elinkaaren pidentäminen, sekä vähennetään syntyneen jätteen haittavaikutuksia ympäristöön ja ihmisten terveyteen. Valmistelu uudelleenkäyttöön käsittää muun muassa puhdistamis- tai korjaamistoimenpiteet, joiden avulla jätteeksi luokiteltavat tuotteet käsitellään siten, että niitä voi käyttää uudelleen alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan. Kierrätyksellä puolestaan tarkoitetaan, että jättemateriaalit käsitellään uudelleen tuotteiksi tai muiksi materiaaleiksi joko alkuperäiseen käyttötarkoitukseen tai muuhun tarkoitukseen. Kierrätys pitää sisällään eloperäisen aineksen uudelleenkäsittelyn, mutta ei energiana hyödyntämistä, joka on jätehierarkiassa sijalla 4. Loppukäsittely tarkoittaa esimerkiksi jätteen sijoitusta kaatopaikoille ja pysyvää varastointia, esimerkkinä säiliöiden sijoittaminen kaivokseen. (Jätedirektiivi 98/2008/EY)

Jätedirektiivi pyrkii yhtenäistämään jäsenmaidensa jättepolitiikkaa selventämällä jätteen määritelmää ja antamalla arviointiperusteet siihen milloin tietty jäte lakkaa olemasta jätettä. Direktiivi sisältää lisäksi kriteerit sivutuotteiden määrittelyyn ja jätteeksi luokittelun päättymiseen. Jätedirektiivin yleisiin vaatimuksiin kuuluu myös laajennettu tuottajavastuu, tarkennettu selvitys jätehuollon vastuista sekä vaatimus jätehuoltosuunnitelmien laadinnasta jäsenvaltioiden vastaaville viranomaisille. (Jätedirektiivi 98/2008/EY)

## 5.2 Jätelaki 646/2011

Jätelainsäädännön kokonaisuudistuksen tavoitteena on ajanmukaistaa lainsäädännön pykälät vastaamaan nykyisiä jäte- ja ympäristönäkökohtia sekä uudistuneen EU:n jätedirektiivin vaatimuksia. Merkittävimmät asiat, jotka uusi jätelaki tuo mukanaan ovat jätehuollon etusijajärjestyksen (jätehierarkian) sitova noudattaminen, tuottajavastuun laajentuminen, jätehuollon toimijoiden vastuiden tarkentuminen, kaatopaikkakäsittelyn huomattava vähentäminen sekä valvonnan ja seurannan tehostaminen. (Seppänen 2012, 5; Ympäristöministeriö 2012a, 1; Ympäristöministeriö 2012b, 4.)

Jätehuollon etusijajärjestys sitoo kaikkia ammattimaisia toimijoita, kuten jätteen tuottajia, käsittelijöitä sekä kunnallisia toimijoita. Pääperiaatteena on, että jätteen syntyminen on ehkäistävä ja jätteiden haitallisuutta tulee vähentää. Mikäli jätettä syntyy, se on ensisijaisesti valmisteltava uudelleenkäyttöön ja toissijaisesti kierrätettävä muulla tavoin. Ellei jätettä voi kierrättää, tulee se hyödyntää esimerkiksi energiana, ja vasta viimeisenä vaihtoehtona on loppukäsittely esimerkiksi kaatopaikalla. Jätehierarkian mukaista käsittelymenetelmää harkittaessa tulee miettiä kokonaisuudessaanärkevin vaihtoehto, jossa on huomioitu jätteen koko elinkaaren aikaiset vaikutukset sekä toimijan tekniset ja taloudelliset mahdollisuudet noudattaa etusijajärjestystä. Tämä edellyttää toiminnanharjoittajalta ja viranomaisilta entistä perusteellisempaa selvitystä jätteiden eri käsittelyvaihtoehdoista, jolloin materiaalihyötykäyttö tulee ottaa tehokkaammin huomioon ympäristölupa-asioissa. (Seppänen 2012, 15; Ympäristöministeriö 2012b, 5.)

Valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa on asetettu tavoite, että vähintään 50 % yhdyskuntajätteestä kierrätetään tai käsitellään biologisesti vuoteen 2016 mennessä sekä rakennus- ja purkujätteestä hyödynnetään materiaalina vähintään 70 % vuoteen 2020 mennessä. Tämä velvoittaa jätehuollon toimijoita kehittämään toimintaansa, kun kaatopaikoille saa sijoittaa nykyistä vähemmän jätettä. (Ympäristöministeriö 2012a, 2.)

Yksi uudistus laissa on myös tuottajavastuun laajentuminen pakkausjätteiden piiriin. Vanhassa laissa tuottaja on vastannut vain elinkeinotominnastaan muodostuvien pakkausjätteiden käsittelystä, mutta uudessa laissa tuottaja tai pakatun tuotteen maahantuoja vastaa pakkausten jätehuollon järjestämisestä. Jätelain nojalla annettavassa asetuksessa ilmoitetaan vähimmäisvaatimukset vaastanottopaikkojen määrästä, jolloin tavoitteena on riittävä palvelutaso koko maassa. Jätehuolto tulee olla järjestetty kahden vuoden kuluessa lain voimaan tulosta eli keväällä 2014. Myös painetun paperituotteen maahantuojalle tuli uuden lain myötä tuottajavastuovelvoite, joten nyt tuottajavastuun pii-

riin kuuluvat keräyspaperi, pakkaukset, sähkö- ja elektroniikkalaitteet, ajoneuvot ja renkaat sekä paristot ja akut. (Seppänen 2012, 45; Ympäristöministeriö 2012a, 1; Ympäristöministeriö 2012b, 12.)

### 5.3 Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 179/2012

Euroopan unionin kaatopaikkadirektiivin (1999/31/EY) pohjalta laadittu valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (861/1997) korvataan valtioneuvoksen asetuksella kaatopaikoista. Kaatopaikkadirektiivin mukaan vuonna 2016 kaatopaikoille saa sijoittaa enintään 35 % biohajoavaa jätettä laskettuna vuonna 1994 syntyneen biohajoavan jätteen määrästä. Tämä tarkoittaisi sitä, että vuonna 2016 syntyvästä biohajoavasta yhdyskuntajätteestä saisi kaatopaikoille sijoittaa enää 25 %. Uuden asetuksen myötä orgaanisen jätteen sijoitusta tavanomaisen jätteen kaatopaikalle rajoitettaisiin vuodesta 2016 lähtien. (Jermakka 2012, 8.)

Valtioneuvoston päätöksessä ja kaatopaikkadirektiivissä puhutaan biohajoavasta jätteestä, jolla tarkoitetaan jätettä, joka voi hajota biologisen toiminnan seurauksena aerobisissa tai anaerobisissa olosuhteissa. Tähän kategoriaan kuuluvat esimerkiksi käsittelemätön yhdyskuntajäte, elintarvike- ja paperijätteet sekä osa rakennus- ja purkujätteistä. Uudessa valtioneuvoksen asetuksessa puhutaan puolestaan orgaanisesta jätteestä, joka kattaa kaiken palavan jätteen eli biohajoavan jätteen ja muut palavat jätteet, kuten muovin. Orgaaninen jäte on tämän takia käsitteenä monipuolisempi, koska biohajoavan jätteen käsite ei pidä sisällä muun muassa muoveja, joiden kaatopaikkasijoitusta halutaan vähentää merkittävästi. (Jermakka 2012, 14.)

Orgaanisen jätteen kaatopaikkakielto tarkoittaa sitä, että tavanomaisen jätteen kaatopaikalle ei saa sijoittaa orgaanista jätettä, jonka kokonaisorgaanisen hiilen (Total Organic Carbon, TOC) pitoisuus tai hehkutushäviön (Loss Of Ignition, LOI) arvo ylittäisi 10 %:n raja-arvon. Rajoituksen mukaan riittää, että vain toinen raja-arvo alittuisi, mutta kielto koskisi myös kaatopaikkarakenteluihin ja maisemointiin hyödynnettävää jätettä. (Jermakka 2012, 20.)

Orgaanisen jätteen kaatopaikkakielto tulee vaikuttamaan merkittävästi kaatopaikoille sijoitettavan jätteen määrään. Sillä on suoraan merkitystä kaatopaikkakaasujen määrän sekä kaatopaikkavesien haittaominaisuuksiin, ja samalla se tehostaa jätteiden hyötykäyttöä. Suurin vaikutus kiellolla on yhdyskuntien sekajätteelle, rakennusjätteelle, puhdistamolietteilte, sekalaiselle puu-, muovi- ja kumijätteelle sekä metsäteollisuuden ja elintarviketeollisuuden orgaaniselle jätteelle, mitkä loppusijoitetaan tällä hetkellä kaatopaikoille. Massa- ja paperiteollisuudessa muodostuvat kaatopaikkajätteet koostuvat pääosin soodasakasta, jäteveden puhdistamoiden lietteistä sekä tuhista. Soodasakka ja meesa-jäte ovat epäorgaanisia jätteitä, joiden LOI-arvo voi nousta korkeaksi karbonaattisuolojen hajoamisen takia. Puolestaan 10 %:n raja-arvoa ei sovelleta energiantuotannon lento- ja pohjatuhkille, joiden liuenneen orgaanisen hiilen (Dissolved Organic Carbon, DOC) pitoisuus on alle 800 mg/kg, mutta TOC-pitoisuus saattaa nousta yli 10 %:n tuhkan sisältävien alkuainehiilen ja karbonaattien takia, eikä pilaantuneelle maa-ainekselle, joka sijoitetaan erilleen omalle alueelleen. (Jermakka 2012, 22 - 27.)



Jotta jäte hyväksytään kaatopaikalle, tulee siitä tehdä samat testaukset kuin aiemminkin sekä olla tiedot jätteen alkuperästä ja koostumuksesta. Tulevaisuudessa kaatopaikkakelpoisuuden arviointiin tulee liittää joko TOC- tai LOI-määritys, koskien kaikkia tavanomaisen jätteen kaatopaikalle sijoitettavia jätteitä. Mikäli jätteen alkuperän takia on luotettavaa tietoa jätteen epäorgaanisuudesta, ei TOC-määritys ole pakollinen. Jätteenvastaanottaja tutkii jätteen muun muassa kuormantarkastuksen yhteydessä, sekä tekee satunnaisia pistokokeita ja aistinvaraisen arvioinnin. (Seppänen 2012, 72; Jermakka 2012, 21.)

## 6 KOHDELAITOSTEN KUVAUS

### 6.1 Kartonkitehdas, Tehdas A

#### 6.1.1 Kuvaus yrityksestä

Tehdas A valmistaa suomalaisesta koivukuidusta puolikemiallista aallotuskartonkia eli flutingia. Lisämassana käytetään aaltopahvin jalostajilta palautuvaa leikkuujätettä sekä omasta tuotannosta muodostuvaa hylkyä, yhteensä noin 5 %. Kierrätyskartongin osuus on pieni, koska kuluttajilta palautuvaa pakkausmateriaalia ei voi käyttää tiukkojen hygieniavaatimusten takia. Tehtaan tuottamaa aallotuskartonkia käytetään ensisijaisesti hedelmä- ja vihanneslaatikoiden valmistukseen sekä lujuutta vaativiin pakkauksiin, kuten koneen osien ja elektroniikan pakkaamiseen. Tehdas on saanut ISO 9001, ISO 14001 ja elintarviketurvallisuus ISO 22000 mukaiset sertifikaatit toiminnastaan ja vakituksia työntekijöitä yrityksellä on noin 180. (Yrityksen A www-sivut 2013; Harvestia 2011, 12 - 14.)

Tehdas A:n tuotannosta 95 % menee vientiin, ja merkittävimmät markkina-alueet ovat Euroopassa Välimeren alue sekä Keski- ja Etelä-Amerikka sekä Filippiinit. Esimerkiksi Italia on yksi tärkeimmistä markkinoista ja siellä asetettu vaatimus neutraalisesta kuidusta valmistetuille elintarvikepakkauksille asettaa myös korkeat tavoitteet tehtaan tuottamalle kartongille. Samanlaista neutraalista ja puhdasta kartonkia valmistaa ainoastaan kaksi muuta tehdasta, ruotsalainen Billerud ja Stora Enson tehdas Heinolassa. (Harvestia 2011, 12 - 14.)

Kartonkitehtaan lisäksi toiminta kattaa puunkäsittelylaitoksen kuorimoineen, puolikemiallisen sellutehtaan, voimalaitoksen, jätevedenpuhdistamon sekä kaatopaikan. Tehtaan tuotantokapasiteetti on 282 000 t/a ja vuorokausituotanto on 650 - 950 t/d, riippuen koneelle ajettavan tuotteen neliömetripainosta. (Tehtaan A ympäristölupa 2007, 4.)

#### 6.1.2 Tuotantoprosessin kuvaus

##### Puunkäsittely

Tehtaalle tulevat koivukuitupuut viedään kuorimolle, jossa puut lastataan hajotuspöydälle ja katkotaan noin kolmen metrin pituisiksi. Sieltä puut kuljetetaan sulatuskuljettimien kautta kuorimarumpuun, joka toimii kuivakuorintamenetelmällä ja kuori voidaan käyttää voimalaitoksella polttoaineena. Kuoritut puut haketetaan ja varastoidaan, jonka jälkeen hake seulotaan ja toimitetaan massatehtaal- le. (Tehtaan A ympäristölupa 2007, 5.)

##### Massanvalmistus

Puolisellutehdas pitää sisällään ensin hakkeen pesurit, joissa hakkeen joukosta poistetaan mahdolliset kiinteät epäpuhtaudet, kuten hiekka ja kivet. Tämän jälkeen on kaksi jatkuvatoimista keittolinjaa, jossa hake keitetään noin +170 °C lämpötilassa ja 10 bar:n paineessa. Sellun valmistusprosessi perustuu NSSC-prosessiin (Neutral Sulphite Semi Chemical), jossa keittoliemenä toimii ammoniumbisul-

fiitin vesiliuos,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ . Keittoliemen valmistusta varten rikki lisätään voimalaitoksen kattilaan ns. elementtirikkinä eli puhtaana kiteisenä mineraalina, joka sulatetaan ja poltetaan (Silvennoinen, 2013). Savukaasut johdetaan pesuriin, joka sisältää kaasujen pesuosan, jäähdytysosan, kaksi keittoneeseen valmistusosaa ja savukaasujen varmistuspesurin. Savukaasut pestään ja jäähdytetään veden avulla noin 55 °C:een, jotta rikkidioksidi absorboituu paremmin ammoniakkiveteen keittoneeseen valmistusosassa. Valmiin keittoliemen  $\text{SO}_2$  -pitoisuutta säädelään haihduttamon lauhteella. Viimeisessä osassa varmistetaan, että loput rikkidioksidin jäänteet imeytyvät veteen ja ne saadaan mukaan keittoliemeen. Pesurissa rikkidioksisin talteenottoaste on 99 %. (Tehtaan A ympäristölupa 2007, 5.)

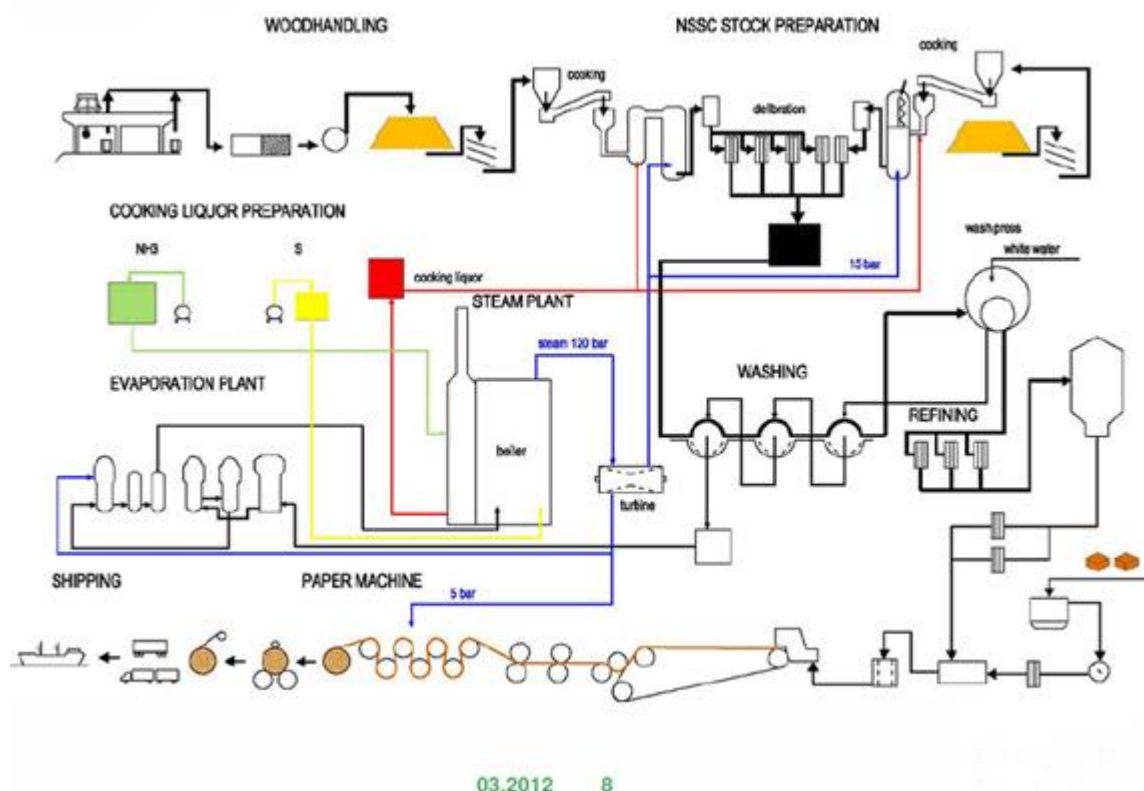
Keiton jälkeen karkea massa kuidutetaan ja pestään vastavirtapesumenetelmällä kolmessa painepesurissa ja yhdessä puristinpesurissa, jossa pesuvetenä toimii kartonkikoneen kiertovesi. Pesuneste, ns. ohutliemi, pumpataan väkevöimistä varten haihduttamolle, jossa sen kuiva-ainepitoisuus nousee 58 %:iin ja muodostuva vahvaliemi voidaan polttaa voimalaitoksella. Puristinpesurilta massa kulkee jauhimille, jossa massan laatu tarkistetaan ja säädetään sopivaksi kartongin valmistusta varten. (Tehtaan A ympäristölupa 2007, 5.)

Lisäksi käytössä on myös lisämassalinja, jossa käsitellään asiakkaiden palauttamaa leikkuujätettä ja omia hylkyrullia. Nämä massat hajotetaan, sekoitetaan, saostetaan ja jauhetaan ennen kartongin valmistusta. (Tehtaan A ympäristölupa 2007, 5.)

#### Kartonkitehdas

Kartonkikoneen keskeisimmät osat ovat perälaatikko, viiraosa, höyrylaatikko, kolmivaiheinen puristinosajäähdytysosa ja 69 kuivatussyylinteristä koostuva kuivausosa sekä näiden jälkeen oleva pope-rullain. Massa syötetään perälaatikkoon noin 1 %:n sakeudessa, jossa se sekoittuu ja jakautuu tasaiseksi rainaksi kartonkikoneen viiraosalle, leveydeltään 6,6 m. Viiraosalla massasta poistetaan suuri osa vedestä, jonka jälkeen massa kulkee höyrylaatikon ja kolmivaiheisen puristinosan kautta kuivatusosaan. Raina kulkee kahden huovan ja puristinsylinterien välissä, jolloin rainasta poistuu vielä vettä, joka johdetaan massatehtaalle. Kartongin kuiva-ainepitoisuus pope-rullaimella on noin 90 %. Kartonkirullat leikataan asiakkaan tilaamiin mittoihin ja kuljetetaan joko tuotevarastoon tai toimitetaan suoraan asiakkaalle. (Sarkkinen 2012, 33.)

Kuviossa 5 on esitetty koko tuotantoprosessi, puun vastaanottamisesta asiakasrullien toimitukseen asti.



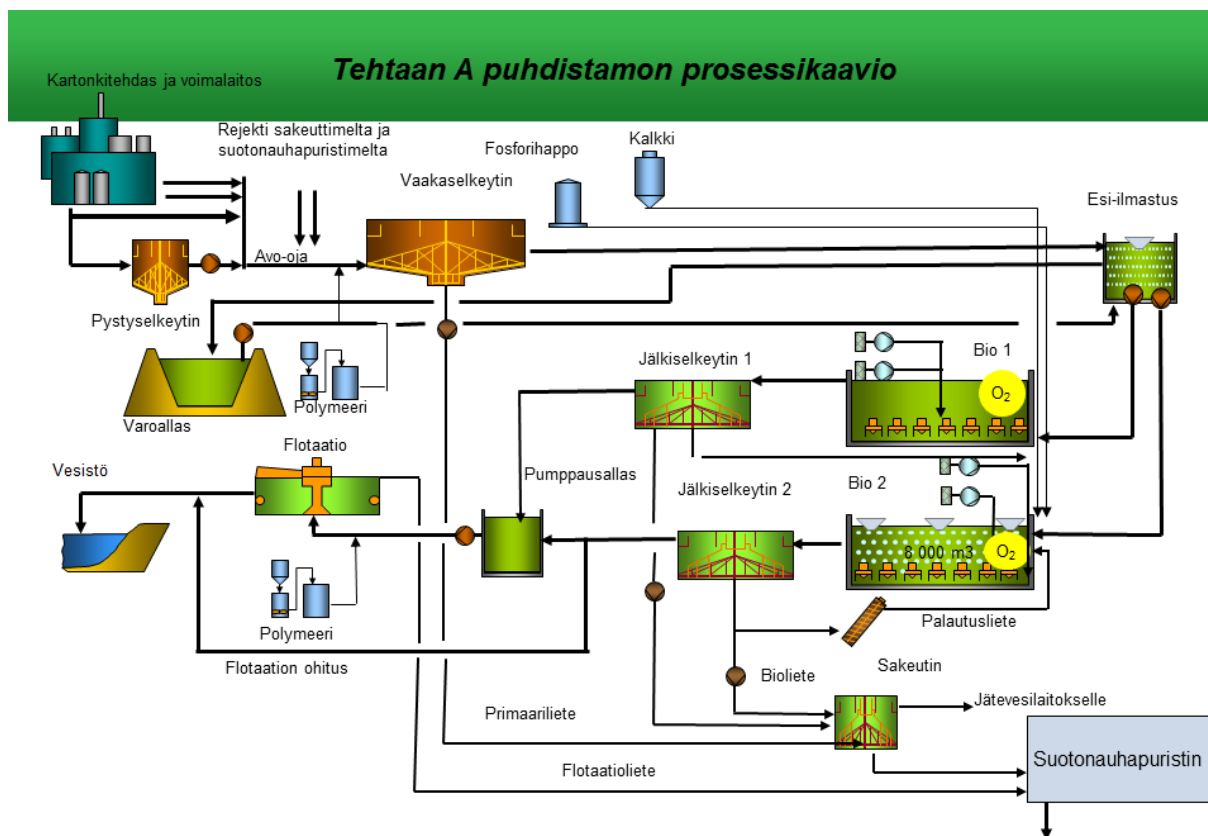
Kuvio 5 Tehtaan A tuotantoprosessi (Koistinen 2013)

### 6.1.3 Jätevesien käsittely

Tehtaan A jätevedenpuhdistamolle tulevat vedet muodostuvat edellisessä luvussa esitellystä tuotantoprosessista, sisältäen muun muassa sekä kuorimon että massa- ja kartonkitehtaan kiertovesien ylijäämän, savukaasupesurin pesuvedet, lisämassalinjan lattia- ja suodosvedet sekä lietteen varastointikentän pintavedet ja tehtaan saniteettivedet. Sadevedet johdetaan erilliseen viemärointiin, jolloin ne eivät rasita puhdistamon toimintaa. (Tehtaan A ympäristölupa 2007, 6.)

Puhdistamo on mitoitettu  $8\,000\text{ m}^3/\text{d}$  virtaamalle ja sen maksimi vuorokausikapasiteetti on  $12\,000\text{ m}^3/\text{d}$ . Viime vuosina puhdistamolta poistuva vesimäärä on ollut noin  $2\,150\,000\text{ m}^3/\text{a}$ , jolloin päivittäiset virtaamat ovat olleet noin  $6\,000\text{ m}^3/\text{d}$ . (Koistinen 2013.) Tehtaan ympäristöluvan mukaan laitoksen puhdistustehokkuus on ollut kiintoaineen osalta 84 %, kemiallinen hapenkulutus 83 %, biologinen hapenkulutus 96 %, fosfori noin 90 %, ammoniumtyppi 59 % ja kokonaistyyppi 73 %.

Tehtaan jätevedenpuhdistamo toimii aktiivilietemenetelmällä, joka koostuu pysty- ja vaakaselkeyttimestä, esi-ilmastuksesta, kahdesta biologisen puhdistuksen linjasta, joissa molemmissa on ilmastus- ja selkeytysaltaat, sekä flotaatioaltaasta, jota tehostetaan kemikaalikäsittelyllä. Jätevedenpuhdistusprosessi on esitetty kuviossa 6. (Koistinen 2013.)



Kuvio 6 Tehtaan A jätevedenpuhdistamon prosessikaavio (Koistinen 2013)

Tehtaalta tulevat jätevedet johdetaan esikäsitteilyyn pystyselkeyttimeen, jonka tehtävänä on tasata virtaama- ja kuormitusvaihteluja sekä toimia matalakuormituksen aikana veden varastointialtaana. Siitä vedet johdetaan väljän kautta vaakaselkeyttimeen, jossa pyritään erottamaan kiintoaines laskeuttamalla. Tätä vaakaselkeytysaltaan pohjalle kasautuvaa lietettä kutsutaan primäärilietteeksi. Vaakaselkeyttimeltä vesi kulkee avo-ojaa pitkin esi-ilmastukseen. (Sarkkinen 2011, 35; Koistinen 2013.)

Ennen esi-ilmastusta jäteveden pH säädetään tarvittaessa kalkilla ja lisätään fosforia ravinteeksi mikrobeille, koska jo esi-ilmastuksessa tapahtuu biologista hajotustoimintaa. Ilmastuksen päätehtävänä on hapettaa jätevesi aerobiseen tilaan, jotta seuraavassa vaiheessa oleva aktiivilieteprosessi lähtee nopeammin käyntiin. Suurten kuormitusjaksojen aikana osa esi-ilmastusaltaan vedestä voidaan johtaa varoaltaseen, josta se palautetaan ylivuotona takaisin. (Kukkonen 2011, 23.)

Seuraava vaihe on aktiivilieteprosessi, jossa on kaksi puhdistuslinjaa, BIO 1 (3 000 m<sup>3</sup>) ja BIO 2 (8 000 m<sup>3</sup>). BIO 1:stä käytetään yleensä varoaltaana, jolloin BIO 2 on jatkuvasti toiminnassa. Altaissa on pinta- ja pohjailmastimia riittävän happipitoisuuden ja sekoituksen takaamiseksi, jotta mikrobiologinen hajotustoiminta olisi mahdollisimman tehokasta. Jätkiselkeytyksessä liete laskeutuu altaan pohjalle, ja se poistetaan joko ylijäämälietteenä lietteenkäsittelyyn tai johdetaan takaisin ilmastusaltaaseen palautuslietteenä. Tätä ylijäämä lietettä kutsutaan biolietteeksi ja se johdetaan yhdessä

primäärilietteen kanssa sakeuttimen kautta suotonauhapuristimelle, joka kuivaa lietteen 18 - 25 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. (Kukkonen 2011, 24; Koistinen 2013.)

Selkeytynyt jätevesi voidaan tarvittaessa ohjata vielä flotaattoriin, jossa vedessä oleva kiintoaines saostetaan käyttäen hyödyksi saostuskemikaaleja. Saostunut liete nostetaan dispersioveden avulla pintaan ja siirretään lietetiivistämöön. Puhdistetut vedet johdetaan lopuksi läheiseen vesistöön. (Kukkonen 2011, 24 - 25.)

Vuonna 2012 puhdistuksen tuloksena syntyi kuivattua lietettä noin 38 000 tonnia, jonka kuiva-ainepitoisuus oli keskimäärin 23 %. Liete kuljetetaan suotonauhapuristimelta ulos varastointikaukaloon ja sieltä edelleen lietekentälle aumavarastointiin, josta Ekokem Oy hakee lietteen omaan käsittelynsä. (Koistinen 2013; Kukkonen 2011, 25.)

## 6.2 Integroitu sellutehdas, Tehdas B

### 6.2.1 Kuvaus yrityksestä

Tehdas B kattaa hienopaperitehtaan, johon sisältyy puunkäsittelylaitos ja sellun tuotanto kuitulinjalta, sekä sahatehtaan, jossa valmistetaan kuusisahatavaraa puuseppä- ja rakennusteollisuuden raaka-aineeksi. Hienopaperitehtaassa valmistetaan päällystämätöntä hienopaperia, kuten toimistopaperia, kirjekuoripaperia sekä ohutta tulostuspaperia, joiden raaka-aineena käytetään oman sellutehtaan tuottamaa valkaistua koivu- ja mäntysellua. Vuoden 2013 paperintuotantokapasiteetti on 285 000 tonnia, josta noin 97 % menee vientiin ulkomaille, EU:n alueen ollessa suurin markkina-alue. Sellutehdas tuottaa vuosittain noin 225 000 tonnia ECF (Elementary Chlorine Free) -menetelmällä valkaistua koivu- ja mäntysellua. Hienopaperitehdas oheislaitoksineen työllistää yhteensä 260 vakituista ja määräaikaista työntekijää. Sahan tuotantokapasiteetti on noin 260 000 m<sup>3</sup> ja työntekijöitä yhteensä 85. (Yrityksen B www-sivut 2013)

### 6.2.2 Tuotantoprosessin kuvaus

#### Puunkäsittely

Tehtaalle tulevat puut vastaanotetaan kuorimon kentälle, jonka jälkeen ne kuivakuoritaan ja haketaan. Syntynyt hake toimitetaan sellutehtaalle massanvalmistusta varten. (Tehtaan B ympäristölupa 2008, 6.)

#### Massanvalmistus ja hienopaperitehdas

Sellun valmistukseen käytetään vuorotellen havupuuta ja koivua. Keittoliemenä toimii valkolipeä, joka on natriumhydroksidin (NaOH) ja natriumsulfidin (Na<sub>2</sub>S) seos. Yhdisteessä natriumhydroksidi toimii ligniiniä pilkkovana kemikaalina ja natriumsulfidi puolestaan nopeuttaa keittoreaktiota sekä vähentää selluloosan irtoamista. Keittäminen tapahtuu jatkuvatoimisella keittimellä 170 °C:n lämpöti-

lassa ja 7 bar:n paineessa. Valkaisematon massa lajitellaan painesihdeillä, jolloin massasta poistetaan kuituuntumaton oksa- ja tikkujae sekä muut epäpuhtaudet. Tämän jälkeen massa saostetaan ja pestään painepesurilla ennen valkaisu. Keiton sivutuotteina syntyy tärpähtiä ja raakamäntyöljyä, jotka toimitetaan jatkojalostettaviksi. Tärpähtiä muodostuu vuodessa keskimäärin 500 tonnia ja mäntyöljyä noin 10 000 tonnia. (Tehtaan B ympäristölupa 2008, 6.)

Seuraavana vaiheena on valkaisu, joka pitää sisällään kaksivaiheisen happidelignifioinnin ja kolmivaiheisen valkaisuprosessin. Happidelignifioinnissa eli happivalkaisussa massan ligniinipitoisuutta pienennetään edelleen happikaasun ( $O_2$ ) avulla. Varsinaisessa valkaisussa hyödynnetään ECF-menetelmää, jolloin prosessissa ei käytetä alkuainaklooria vaan sen tilalla klooridioksidia ( $ClO_2$ ) sekä natriumhydroksidia, happea ja vetyperoksidia ( $H_2O_2$ ). (Tehtaan B ympäristölupa 2008, 6 - 7.)

Sellun keittokemikaalien talteenotto-prosessi sisältää mustalipeähaihduttamon, soodakattilan, kaustistamon ja meesauunin sekä mäntyöljyn keittämön. Haihduttamossa keittokemikaaleja ja puusta liuonneita aineita sisältävä mustalipeä väkevöidään, jolloin sen kuiva-ainepitoisuus nousee 17 %:sta 75 %:iin. Haihdutuksesta muodostuvat vesihöyryjakeet erotetaan toisistaan, jolloin puhdas lauhde hyödynnetään prosessissa lämpiminä vesinä ja sekundäärilauhde käytetään monivaihehaihduttamon loppupäässä siten, että mahdollisimman paljon rikkiyhdisteitä sitoutuu puhdistettavaan lauhdemäärään. Haihduttamalla mustalipeästä erotetaan lisäksi suopaa, josta valmistetaan raakamäntyöljyä. (Tehtaan B ympäristölupa 2008, 7.)

Seuraavaksi mustalipeä johdetaan soodakattilaan, jotta keittokemikaalit saadaan uudelleen käyttöön ja liuennut puuaines voidaan hyödyntää energiana. Soodakattilasta saadaan noin 40 % tehtaiden tarvitsemasta lämpöenergiasta. Soodakattilassa muodostuva kemikaalisula, joka on natriumkarbonaatin ja natriumsulfidin seos, liuotetaan laihavalkolipeään. Tuloksena syntyvä viherlipeä johdetaan kaustisointiin, jossa se selkeytetään ja natriumkarbonaatti muutetaan kalkin avulla natriumhydroksidiksi. Reaktiossa muodostuu meesaa eli kalsiumkarbonaattisakkaa, joka suodatetaan ja jäljelle jäävä suodos voidaan käyttää keittolipeänä. Suodatettu meesa pestään, kuivataan ja poltetaan uunissa, jolloin se hajoaa hiilidioksidiksi ja kalsiumoksidiksi eli ns. poltetuksi kalkiksi (Tehtaan B ympäristölupa 2008, 8.)

Hienopaperitehtaassa on käytössä yksi paperikone (Pk 3), jossa hyödynnetään oman sellutehtaan valkaistua koivu- ja mäntysellua sekä tehdään pintakäsittely tärkkelyksellä. Paperikoneiden vedenkäyttö on minimoitu ja käytössä on vastavirtaperiaatteella toimivat kiertovesijärjestelmät. Hienopaperitehtaan vedenkulutus on vain noin  $15 \text{ m}^3/\text{t}$  sellua, kun taas sellutehtaalla syntyy 55 % koko tehtaan B jätevesimäärästä eli  $41 \text{ m}^3/\text{t}$  sellua. (Tehtaan B ympäristölupa 2008, 8.)

### 6.2.3 Jätevesien käsittely

Tehtaan B jätevedet puhdistetaan mekaanis-biologisella puhdistamolla, jota tehostetaan tarvittaessa kemiallisella käsittelyllä (Kuvio 7). Vuonna 2012 puhdistukseen tuleva jätevesivirtaama oli keskimää-

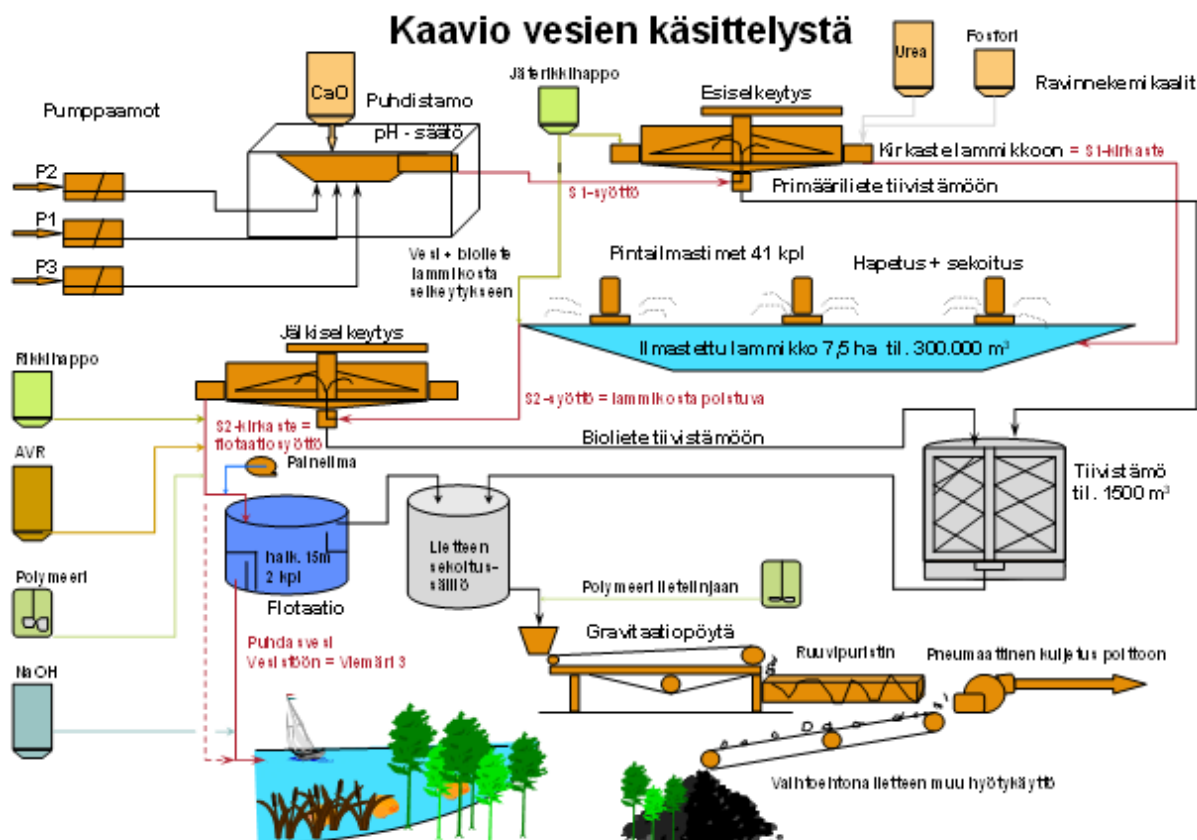
rin noin 32 000 m<sup>3</sup>/d, jolloin koko vuonna virtaama oli noin 11,6 milj. m<sup>3</sup>. (Pakarinen 2013). Tehtaan B ympäristöluvan mukaan puhdistamon puhdistustehokkuus on ollut vuonna 2006 kiintoaineen osalta 95 %, kemiallisen hapen osalta 86 % ja biologisen hapenkulutuksen osalta 95 % sekä fosforin puhdistusteho on ollut 69 %, typen 19 % ja AOX-yhdisteiden 54 %.

Ennen ensimmäistä selkeytystä jäteveden pH säädetään sopivaksi joko poltetulla kalkilla (CaO) tai tehtaalla syntyvällä jäterikkihapolla. Esiselkeytyksessä vedestä poistetaan painavimmat kiintoainepartikkelit, kuten puukuidut ja purut. Tätä esiselkeytysaltaan pohjalle kasaantuvaa ainesta kutsutaan primäärilietteeksi. Seuraavassa vaiheessa puhdistettava vesi kulkee ilmastusaltaaseen, jossa elävät pieneliöt eli ns. aktiiviliete hajottaa orgaaniset aineet hiilidioksidiksi ja vedeksi. Ilmastusallas on 7,5 ha suuruinen ja tilavuudeltaan 300 000 m<sup>3</sup>, jolloin viipymä on noin 4 - 5 vrk. Altaassa on sekä hape-  
tin- että sekoituslaitteisto tasaisien olosuhteiden luomiseksi. Yhteensä käytössä on 35 pintailmastinta, joiden lisäksi altaaseen voidaan lisätä pieneliöiden tarvitsemia ravintoaineita, kuten typpeä ja fosforia. (Pakarinen 2011, 2.)

Ilmastuksen jälkeen vesi johdetaan jälkiselkeyttimelle, jossa kuollut biomassa laskeutuu selkeyttimen pohjalle ja pumpataan tiivistämölle. Tätä kuollutta biomassaa kutsutaan biolietteeksi. Myös esiselkeyttimestä johdettu primääriliete pumpataan tiivistämölle. Tiivistämöltä liete kulkee lietteen sekoitussäiliön kautta ruuvipuristimelle, jossa liete puristetaan niin kuivaksi, että se voidaan joko polttaa tehtaan voimalaitoksessa tai hyötykäyttää muualla. Jälkiselkeytyksen läpäissyt puhdistettava vesi voidaan vielä johtaa flotaatioaltaan kautta, mikäli se sisältää liian korkeita fosforin ja orgaanisen aineen pitoisuuksia. Tässä vaiheessa veteen lisätään rikkihappoa, flokin muodostukseen rautapitoista alumiinisulfaattia (AVR) tai natriumhydroksidia. Lopuksi puhdistettu vesi johdetaan takaisin läheiseen vesistöön. (Pakarinen 2011, 2.)

Vedenlaatua tarkkaillaan jatkuvasti ja tärkeimmät määritykset liittyvät typen, fosforin ja kiintoaineen määrään sekä biologiseen ja kemialliseen hapenkulutukseen. (Pakarinen 2011, 3.)





Kuvio 7 Tehtaan B jätevedenpuhdistamon prosessikaavio

Puhdistuksessa muodostuvaa kuivattua lietettä syntyy noin 20 000 t/a, ja sen kuiva-ainepitoisuus on keskimäärin 40 %. Kuivatut lietteet on toimitettu viime vuosina kokonaan materiaalihyötykäyttöön, pääosin puolet on käytetty tehtaan oman kaatopaikan rakenteisiin ja loput muille kaatopaikoille. (Pakarinen 2013).

### 6.3 Jätekuukko Oy

Jätekuukko Oy on vuonna 2001 perustettu 17 kunnan omistama jätehuolto-yritys, jonka tehtävänä on vastata jätehuollon järjestämisestä osakaskuntien alueella toimiville jätteen tuottajille. Tämä pitää sisällään jätteiden hyödyntämis- ja käsittelypalvelut, jätteen loppusijoituksen, Kuopion jätekeskuksen ja kuntien jäteasemien ylläpidon sekä asiakaspalvelun ja tarpeellisen raportoinnin viranomaisille. Jätekuukko kilpailuttaa jätekuljetukset asiakkaiden puolesta. Yhtiö ei tavoittele voittoa tai jaa osinkoa, vaan se kattaa toimintansa jätteen tuottajilta perittävillä jätemaksuilla. (Jätekuukon vuosikertomus 2011, 2.)

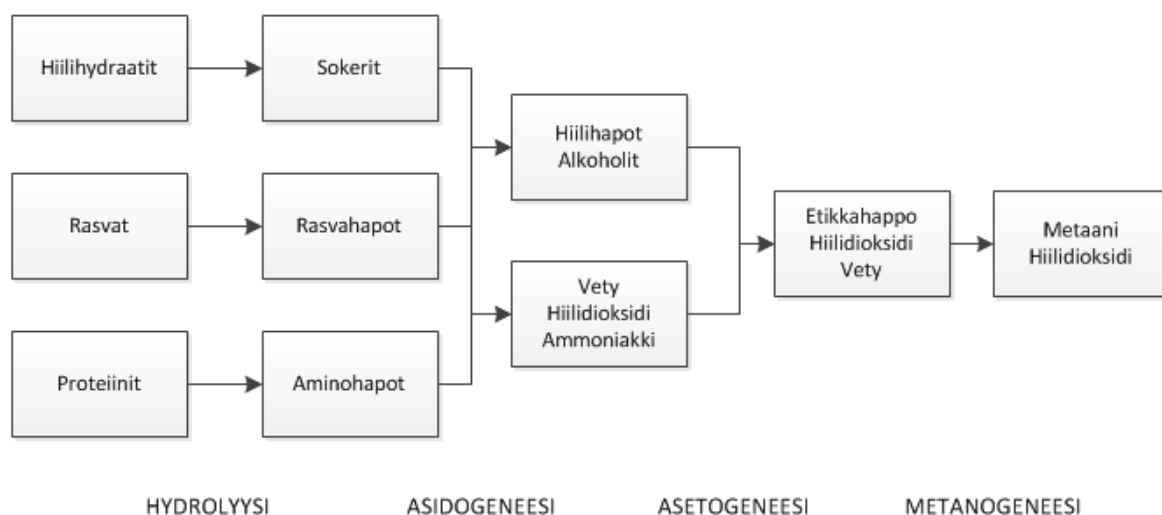
Vuonna 2011 Kuopion jätekeskukselle otettiin vastaan jätettä yhteensä 152 000 tonnia, josta loppusijoitukseen päätyi vain 22 %. Suuri merkitys tähän oli jäteperäisen polttoaineen valmistus kehittämällä sekajätteen murskausta. Pientuojien alueella Pikkukukossa asioi vuoden 2011 aikana lähes 38 000 asiakasta. Päivittäinen asiakasmäärä vaihteli vuodenajan mukaan 50 - 300 asiakkaan välillä. (Jätekuukon vuosikertomus 2011, 15.)

Jätekukon toimialueella vuonna 2012 kerättiin biojätettä yhteensä 7 450 tonnia, joka kuljetetaan Outhokumpuun Jyrin käsittelylaitokselle kompostoitavaksi. Lisäksi kaupoilta kerätään Bio2:sta eli myymättä jääneitä muovi-, paperi- ja pahvikääreisiin pakattuja biojätteitä, jotka käsitellään Kiteellä Bio10-käsittelylaitoksella. Vuonna 2012 Bio2:sta kerättiin Jätekukon alueella 590 tonnia. (Pulkkinen 2013)

## 7 JÄTEVESILIIETTEIDEN BIOKAASUPROSESSI JA SEN HYÖDYNTÄMINEN

### 7.1 Biokaasuprosessin vaiheet

Biokaasutus on hapettomissa eli anaerobisissa oloissa tapahtuvaa orgaanisen aineen hajotusta, jossa useat eri mikrobit osallistuvat hajotusketjun eri vaiheisiin tuottaen samalla muun muassa metaania (Kuvio 8).



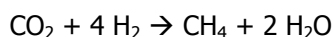
Kuvio 8 Biokaasuprosessin vaiheet (Biogas Handbook 2008, 21.)

Anaerobisen hajoituksen ensimmäinen vaihe on hydrolyysi, jossa hydrolyyttinen bakteeriryhmä pilkkoo orgaanisia yhdisteitä, kuten hiilihydraatteja, rasvoja ja proteiineja, yksinkertaisimmiksi yhdisteiksi, kuten sokereiksi sekä rasva- ja aminohapoiksi. (Lund 2012, 10.)

Toinen vaihe on asidogeneesi eli happokäyminen, jossa haponmuodostajabakteerit hajoittavat hydrolyysivaiheen lopputuotteita muun muassa orgaanisiksi hapoiksi, alkoholeiksi, vedyksi, hiilidioksidiksi, ammoniakiksi sekä pitkäketjuisiksi (LCFA) että haihtuviksi rasvahapoiksi (VFA). (Lund 2010, 11.)

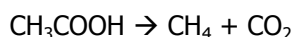
Kolmannessa vaiheessa eli asetogeneesissa orgaaniset hapot sekä alkoholit muuttuvat etikkahapoksi, hiilidioksidiksi ja vedyksi. Asetogeeniset bakteerit elävät symbioosissa seuraavan vaiheen metanogeenien kanssa, sillä asetogeenit vaativat alhaisen vetytitoisuuden ympäristössään pystyäkseen toimimaan. Jos asetogeneesi keskeytyy, niin myös metanogeneesi loppuu, koska se ei saa tarvitsemaansa ravinnetta. Ja sama käy myös toisin päin, mikäli metanogeneesi jostain syystä häiriintyy, niin vetytitoisuus kasvaa liian suureksi asetogeenien toimintaa varten. (Lund 2010, 11.)

Viimeinen vaihe on siis metanogeneesi, jossa arkibakteereihin kuuluvat metanogeenit tuottavat metaania. Metanogeenit ovat ainutlaatuisia bakteereja, sillä ne ovat ainoita organismeja, jotka pystyvät tuottamaan metaania. Niistä kaksi ryhmää, hydrogenotrofiset metanogeenit ja asetotrofiset metanogeenit, ovat tärkeitä anaerobisen hajoituksen kannalta. Ensimmäinen ryhmä käyttää hiilidioksidia ja vetyä tuottaakseen metaania ja vettä:



Tämä reaktio käyttää hyödyksi asetogeenisten bakteerien tuottamaa vetyä, ja pitääkin sen pitoisuuden alhaisena, jotta asetogeenit pystyvät toimimaan.

Toinen ryhmä pitää sisällään asetotrofisia metanogeenieja, jotka pilkkovat etikkahappoa metaaniksi ja hiilidioksiiksi:



Metanogeenit ovat sekä hitaasti kasvavia että herkkiä olosuhteiden muutoksille, joten biokaasuprosessi tulisi pitää mahdollisimman stabiilissa tilassa. Metanogeenit ovat myös obligaatiaerobeja, joten ne kuolevat, jos niiden elinympäristössä esiintyy happea. (Lund 2010, 12 - 13.)

## 7.2 Biokaasuprosessin optimiolosuhteet

Optimiolosuhteissa prosessi on tasapainossa, niin osavaiheiden kuin bakteeriryhmien välillä ja samalla metaanin tuotto on mahdollisimman suurta. Olosuhteisiin vaikuttaa moni parametri, joista tärkeimmät ovat lämpötila, pH, alkaliteetti, ravinteet, sekoitus sekä orgaaninen kuormitus ja viipymä. Tasapainon pitäminen prosessin aikana voi olla haastavaa, koska yksi parametri voi vaikuttaa epäsuorasti toiseen parametriin. Alla on kuvattu tarkemmin parametrien raja-arvoja ja optimiolosuhteita.

### 7.2.1 Lämpötila

Metaania tuottavat metanogeenibakteerit toimivat aktiivisesti kahdella eri lämpötila-alueella, mesofiilillä alueella 35 - 37 °C ja termofiilisellä lämpötila-alueella 50 - 55 °C. Mesofiilisen anaerobisen hajoamisen etuina ovat hyvä ja tasainen kaasuntuotto, lyhyt viipymä sekä pienempi lämmönkulutus, jolloin energiakustannukset jäävät pienemmiksi kuin termofiilisen prosessin aikana. Termofiilinen lämpötila-alue puolestaan tehostaa ja nopeuttaa hajotusta, jolloin samalla myös syötteen sisältämät patogeenit tuhoutuvat. Huonoja puolia ovat prosessin hidas käynnistyminen sekä herkkyys häiriöille. (Sura 2008, 8.)

Etenkin metanogeenibakteerit ovat herkkiä lämpötilavaihteluiden suhteen. Tehokkaassa prosessissa lämpötilan ylläpitäminen tasaisena on parempi kuin, että jatkuvasti pyritään optimilämpötilaan. Metanogeenille on tärkeää, ettei lämpötilagradientteja synny. (Lund 2010, 13 - 14.)

### 7.2.2 pH ja alkaliteetti

Optimi pH-alue anaerobiselle hajoamiselle on noin 6,5 - 7,5, jolloin metanogeenit toimivat tehokkaimmin. Hydrolyysi- ja asidogeeniesivaiheessa toimivien bakteerien on kuitenkin havaittu hajoitta-

van orgaanista ainesta jopa pH:ssa 5 - 6. Happokäyminen laskee pH:ta, mikäli prosessia kuormitetaan liian nopeasti, jolloin asidogeenit tuottavat paljon happoja ja metanogeenien toiminta häiriintyy. Tästä syystä myös asetogeneesien toiminta häiriintyy, kun prosessiin kertyy vetyä, joka liian korkeana pitoisuutena on haitallista asetogeneesien toiminnalle. Samalla myös propionihappoa alkaa kertyä, koska asetogeneesibakteerit eivät hajota sitä tarpeeksi nopeasti. Tällöin syntyy helposti kierre, jossa reaktori menee ns. "hapoille". (Lund 2010, 16.)

Alkaliteetti kuvaa aineen kykyä vastustaa pH:n muutoksia, ja yleensä biokaasuprosessit ovatkin itsepuskuroituvia. Tällöin alkaliteetti on korkea, eikä hapon lisäys aiheuta voimakasta pH:n laskua. Tarvittaessa prosessiin voidaan lisätä kemikaaleja, esimerkiksi natriumhydroksidia (NaOH), pH:n säätöä varten. Kalkkia ei tule käyttää, koska se reagoi hiilidioksidin kanssa muodostaen laitteistoihin saostuvaa kalsiumkarbonaattia. (Lehtomäki 2007, 25.)

### 7.2.3 Ravinteet

Syötön tulisi sisältää oikeassa suhteessa kaikkia anaerobisten mikrobien tarvitsemia ravinteita, joista tärkeimmät ovat hiili (C), typpi (N) ja fosfori (P). Hiilen ja typen optimaalinen suhde (C/N-suhde) anaerobiselle hajotukselle on noin 25:1. Jos typpeä on liikaa, niin hajoamisen yhteydessä muodostuu ammoniakkia, joka nostaa pH:ta ja toimii prosessin inhibiittorina. Muita tärkeitä ravinteita ovat muun muassa rikki (S), kalium (K), magnesium (Mg), kalsium (Ca), rauta (Fe), natrium (Na) ja kloori (Cl). (Lund 2010, 14 - 15.)

Monesti syöte sisältää kaikkia tarvittavia ravintoaineita, mutta väärässä suhteessa. Tasapainottamalla ravinnemääriä voidaan eri jätemateriaaleja sekoittaa keskenään, jolloin anaerobinen hajotus tehostuu. Syötteen ominaisuudet olisikin hyvä selvittää esimerkiksi laboratoriokokeiden perusteella, jotta hajotusprosessista tulisi mahdollisimman tehokas. (Lehtomäki 2007, 25.)

### 7.2.4 Viipymä ja orgaaninen kuormitus

Hydraulinen viipymä (HRT, Hydraulic Retention Time) kuvaa, kuinka kauan syöte viipyy reaktorissa ja se lasketaan kaavalla:

$$\theta = \frac{V_r}{Q} \quad (1)$$

missä  $\theta$  on hydraulinen viipymä,  $V_r$  on reaktorin tilavuus ja  $Q$  on syötön tilavuusvirta (Lund 2010, 20).

Suomalaisilla biokaasulaitoksilla tyypillinen viipymä on 12 - 30 vuorokautta. Riittävän pitkällä viipymäajalla saavutetaan parempi biokaasuntuotto ja tehokas orgaanisen aineen reduktio sekä lietteen hygienisointi. Tällöin prosessista tulee tasaisempi ja se kestää paremmin olosuhteiden muutoksia.

Pitkä viipymä kuitenkin lisää kustannuksia, koska reaktorikoko sekä lämmitys- ja sekoituskulut kasvavat. Liian lyhyt viipymä taas johtaa herkästi reaktorin ylikuormitukseen, jolloin orgaanisen aineen reduktio jää liian pieneksi ja metaanintuotto laskee. Viipymä on sopivalla tasolla, kun orgaanisen aineen reduktio prosessissa on noin 50 - 60 %. (Latvala 2009, 35.)

Orgaanisella kuormituksella tarkoitetaan syöteseoksen orgaanisen aineen massaa reaktorin tilavuusyksikköä ja vuorokautta kohden. Orgaaninen kuormitus lasketaan kaavalla:

$$\frac{TS * \left( \frac{VS - \%}{100} \right) * Q}{V} \quad (2)$$

missä TS on kiintoainepitoisuus (kg/m<sup>3</sup>), VS- % on orgaanisen aineen prosenttiosuus kokonaiskiintoaineesta, Q on syöttövirtaama (m<sup>3</sup>/d) ja V on reaktorin tilavuus (m<sup>3</sup>). (Lund 2010, 21 - 22.)

Tyypillinen kuormitus vaihtelee välillä 3 - 9 kgVS/r-m<sup>3</sup>/d. (Latvala 2009, 34.)

#### 7.2.5 Sekoitus

Sekoitus on ensiarvoisen tärkeää anaerobisen hajotuksen yhteydessä. Sekoituksen avulla ravinteet jakautuvat tasaisesti ja mikrobit pääsevät paremmin kosketuksiin hajotettavan materiaalin kanssa. Onnistuneella sekoituksella voidaan varmistaa myös lämpötilan tasaisuus koko reaktorin alueella samalla, kun estetään substraatin paakkuuntuminen. Sekoitus tulee optimoida laitoskohtaisesti, sekoitustapoja ovat mm. mekaaninen sekoitus, lietteen pumppaus sekä biokaasun kierrätys. Myös sekoitusnopeuden optimointi on keskeinen tekijä, sillä liian voimakas sekoitus voi inhiboida hajotusta. (Sura 2008, 7.)

#### 7.3 Hajoamista hidastavat tekijät

”Biologisissa prosesseissa inhibitiolla tarkoitetaan yleisesti jonkin kemiallisen tai fysikaalisen tekijän aiheuttamaa haittavaikutusta, joka häiritsee prosessin normaalia toimintaa, tuhoaa tai inaktivoi hajotuksesta vastaavat mikrobit.” (Lehtomäki 2007, 26.)

Biokaasuprosessi voi häiriintyä liian nopeasta tai voimakkaasta prosessiparametrin muutoksesta, esimerkkinä lämpötilan voimakas putoaminen. Varsinaisia inhibiittoreita on kahdenlaisia, ns. tuoteinhibitio tarkoittaa, että normaalista anaerobisesta hajotuksesta muodostuvat välituotteet inhiboivat biokaasuprosessia. Toisessa inhibition esiintymismuodossa prosessissa käsiteltävä aines itsessään sisältää jotain, mikä inhiboi hajotustoimintaa. Tuoteinhibitioista on esimerkkinä haihtuvat rasvahapot (VFA), joita muodostuu herkästi, jos käsiteltävä materiaali on helposti hajoavaa tai biokaasuprosessia kuormitetaan alussa liian nopeasti. Tällöin haponmuodostajabakteereilla on runsaasti ravintoa saatavilla, eivätkä hitaasti kasvavat metanogeenit ehdi hajottamaan happoja tarpeeksi nopeasti. Tästä syystä VFA:ja alkaa kertyä prosessiin, jolloin ne alentavat prosessin pH:ta ja metaanintuotto

voi lasketa tai pysähtyä kokonaan. Erityisesti propionihapon on huomattu inhiboivan mikrobien toimintaa, mikäli sen konsentraatio nousee yli 900 mg/l. (Lehtomäki 2007, 26 - 27; Virta 2011, 14.)

Myös prosessin puskurikyvyllä on merkitystä pH:n alenemiseen, eli mitä pienempi puskurikyky on, niin sitä helpommin pH laskee. Puskurikykyä kuvaa alkaliteetti, jonka suositeltava pitoisuus on noin 3500 – 5000 mgCaCO<sub>3</sub>/l. (Virta 2011, 14.)

Sulfaatin pelkistytessä syntyvä rikkivety eli divetyysulfidi (H<sub>2</sub>S) on myös erittäin toksista metanogeenille. Korkeina pitoisuuksina rikkivety inhiboi voimakkaasti metaanintuottoa ja divetyysulfidin muodostaminen voi syrjäyttää metaanintuotannon. Lisäksi rikkivety on herkästi laitteistoa korrosoivaa, minkä takia se on hyvä poistaa joko substraatista tai muodostuneesta kaasusta. Se voidaan poistaa muun muassa lisäämällä biokaasureaktoriin happea noin 2-6 % biokaasun tilavuudesta, jolloin divetyysulfidi reagoi hapen kanssa muodostaen alkuainerikkiä. Rikkivedyn määrää voidaan vähentää myös lisäämällä rautakloridia (FeCl<sub>3</sub>) reaktoreihin. Muita rikkivedyn poistomenetelmiä on esimerkiksi aktiivivihiilisuodatus, jossa rikkivety adsorboidaan kalsiumkarbonaatilla (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) kyllästettyyn aktiivivihiileen sekä kaasun johtaminen rautaoksidia (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tai rautahydroksidia (Fe(OH)<sub>3</sub>) sisältävän materiaalin läpi, jolloin rikkivety reagoi näiden aineiden kanssa muodostaen rautasulfidia (FeS). (Ahonen 2010, 21 - 22.)

Metsäteollisuuden lietteiden sisältämä ligniini on yksi merkittävä tekijä biokaasutuksen kannattavuuden näkökulmasta katsottuna. Pehmeät puulajit, kuten kuusi ja mänty sisältävät keskimäärin 42 % selluloosaa ja 27 % hemiselluloosaa sekä ligniiniä. Kovat puulajit, kuten koivu sisältää selluloosaa suunnilleen saman verran eli 40 %, hemiselluloosaa 37 % ja ligniiniä vain 20 %. Anaerobinen hajotus on haasteellista, koska ligniini on sitoutunut voimakkaasti selluloosan ja hemiselluloosan ympärille, ja ligniini on heikosti hajoavaa. Tämän lisäksi ligniinin mahdolliset hajoamistuotteet ovat myrkyllisiä metaania tuottaville bakteereille. (Taherzadeh 2008, 1623 - 1626.)

Mikäli syöte sisältää paljon proteiinipitoista ainesta, saattaa typpiyhdisteitä, kuten ammoniakkia (NH<sub>3</sub>), esiintyä prosessissa runsaasti. Ammoniakilla on prosessissa inhiboiva vaikutus, jos sen pitoisuus nousee yli 150 mg/l. (Latvala 2009, 36 - 37.) Prosessissa esiintyvä epäorgaaninen typpi havaitaan yleensä ammoniakin vesiliuoksena eli ammoniumhydroksidina, joka ei ole yhtä inhiboiva kuin ammoniakki. Mikrobit kestävät sitä pitoisuuden ollessa alle 1500 – 8000 mg/l (Lund 2010, 18.)

Myös hajotustoiminnan tarvitsemia ravinteita voi esiintyä prosessissa liikaa, jolloin niilläkin on toksisia vaikutuksia. Esimerkiksi Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> ja Mg<sup>2+</sup> inhiboivat lievästi prosessia, jos niiden pitoisuus on välillä 1000 - 5500 mg/l ja voimakasta inhiboitumista mikäli pitoisuus on 3000 – 12 000 mg/l. (Latvala 2009, 34.)

## 8 LABORATORIOKOKKEET

### 8.1 Laboratoriokokeiden lähtökohdat ja suunnittelu

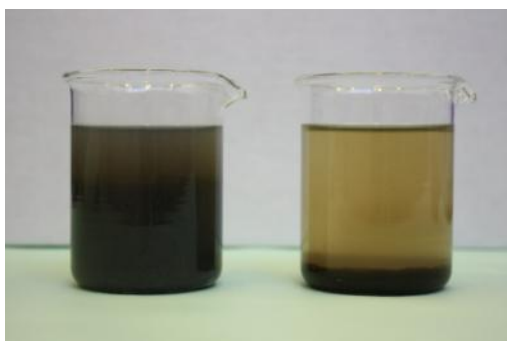
Laboratoriokokeissa käytettävät kartonkitehtaan (Tehdas A) primääri- ja biolietteet noudettiin keski-viikkona 2.1.2013. Integroidun sellutehtaan (Tehdas B) lietteet oli saatu aikaisemmin, 17.12.2012, ja niitä säilytettiin kokeen alkuun asti kylmiössä. Biojätteet noudettiin Kuopion jätekeskukselta 3.1.2013. Biokaasupanoskokeiden tavoiteaikatauluksi asetettiin 4 - 5 viikkoa, sen mukaan kuinka tehokkaasti näytteet tuottaisivat biokaasua. Jatkuvatoimista biokaasulaitteistoa operoitiin 9 viikon ajan.

Kokeissa käytettiin tehtaiden jätevedenpuhdistuksen esiselkeytyksessä muodostuvaa primäärilietettä ja biologisen puhdistuksen jälkiselkeytyksen biolietettä. Kuvassa 1 on tehtaan A lietenäytteet, joista vasemmanpuoleisessa primäärilietteessä oli selvästi huomattavissa puuperäisiä aineita, kuten pieniä tikkuja. Bioliete puolestaan sisälsi silmämääräisesti vähemmän kiintoainesta. Lisäksi tehtaan A primääriliete oli hapanta, pH-arvo oli noin 5, minkä takia lietteet neutraloitiin natriumhydroksidilla ennen kokeiden alkua.



Kuva 1 Tehtaan A primääri- ja biolietteet  
(Kuva Anna Kaivola 2013)

Tehtaan B lietteet (Kuva 2) erosivat tehtaan A lietteistä selvästi värin puolesta ollen hyvin tummia ja primääriliete sisälsi enemmän kiintoainesta kuin tehtaan A primääriliete. Lisäksi tehtaan B molempien lietteiden pH-arvot olivat noin 7.



Kuva 2 Tehtaan B primääri- ja biolieteet  
(Kuva Anna Kaivola 2013)



## 8.2 Kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuuksien määrittäminen

Kohdetehtaiden primääri- ja biolietteiden sekä biojätteen kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet määritettiin SFS 3008 -standardin mukaisesti. Pitoisuustulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4 Tehtaiden A ja B lietteiden sekä biojätteen kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet

Näyte	TS-pitoisuus (%)	VS-pitoisuus (%)
Tehdas A Primääriliete	0,37	0,32
Tehdas A Bioliete	0,36	0,28
Tehdas B Primääriliete	0,62	0,38
Tehdas B Bioliete	0,34	0,14
Biojäte	21,25	19,21

Tehtaan A primäärilietteen ja biolietteiden kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet eivät poikkea kovinkaan toisistaan, mutta tehtaan B primäärilietteen TS- ja VS-pitoisuudet ovat noin kaksinkertaiset verrattuna biolietteiden pitoisuuksiin.

Ennen pitoisuusmäärittäystä biojäte murskattiin pienempään palakokoon mobiilibiokaasulaitoksen murskaimella. Jäte-erä ajettiin murskaimen läpi kolmeen kertaan, minkä aikana jätteet sekoittuivat varsin hyvin. Lisäksi niitä sekoiteltiin lisää, mahdollisimman tasalaatuisen lopputuloksen saamiseksi.

## 8.3 Biokaasupanoskokeet

Biokaasupanoskokeessa tutkitaan, paljonko materiaali tuottaa biokaasua tietyn ajan kuluessa tietyissä olosuhteissa. Tutkimuksissa voidaan käyttää joko mesofiilistä (35 - 38 °C) tai termofiilistä (50 - 55 °C) lämpötila-aluetta.

Tässä työssä käytettiin mesofiilistä lämpötila-aluetta ja kokeen kestoksi valittiin 5 viikkoa, mikä on varsin tyypillinen aika panoskokeiden suorittamiseen. Biokaasupanoskokeessa oli viisi erillistä koesarjaa ja jokaisesta sarjasta tehtiin kolme rinnakkaista koetta. Alla on esitetty koesarjat pullojen numeröijärjestyksessä:

- Pullot 1.0 - 1.2 Ympäri (biokaasutettu liete)
- Pullot 2.0 - 2.2 Tehdas A Primääriliete + Bioliete
- Pullot 3.0 - 3.2 Tehdas A Primääriliete + Bioliete + Biojäte
- Pullot 4.0 - 4.2 Tehdas B Primääriliete + Bioliete
- Pullot 5.0 - 5.2 Tehdas B Primääriliete + Bioliete + Biojäte

Myös näytteitä sisältäviin pulloihin laitettiin ympäriä, jotta biokaasunmuodostus käynnistyisi nopeammin. Kokeet tehtiin viiden litran pulloissa ja niiden täyttöasteena käytettiin 3500 grammaa. Syöt-

tösuhteen haluttiin olevan 50:50 eli VS-pitoisuus sekä näytteen että ympin osalta oli kussakin pullossa yhtä suuri. Näytteen osuuden sai laskettua kaavalla:

$$\frac{3500-x}{x} = VS\text{-suhde}, \quad (3)$$

jossa x on näytteen osuus, kun VS-suhde lasketaan näyte/ympä.

Liitteenä olevassa taulukossa on esitetty jokaiseen pulloon punnitut syötteet ja syötemäärät sekä pH (Liite 1).

Ennen lämpökaappiin sijoitusta jokaiseen pulloon johdettiin vielä puhdasta typpikaasua  $N_2$ , jotta pulloista saadaan poistettua happi ja metaanintuotto käynnistyy nopeammin. Pulloihin asetettiin PVC-letkulla kaasunkeräyspussit ja ne laitettiin lämpökaappiin 37 °C:seen viiden viikon ajaksi (Kuva 3).



Kuva 3 Pulloja pidettiin lämpökaapissa viiden viikon ajan.

(Kuva Anna Kaivola 2013)

Koejakson aikana pulloja täytyi käydä sekoittamassa päivittäin, jotta näytteet eivät kerrostuisi eikä biokaasun muodostus heikkenisi. Muodostunut biokaasu analysoitiin aina tarvittaessa, kun silmä-  
määräisesti havainnointiin, että kaasua oli muodostunut vähintään puoli litraa. Muodostuneen kaasun tilavuuden mittaamiseen käytettiin vesilukkotoimista säiliötä (Kuva 4) ja pitoisuudet mitattiin GA2000 Plus -analyysilaitteella (Kuva 5).



Kuva 4 Muodostuneen kaasun  
tilavuuden mittaussäiliö  
(Kuva Anna Kaivola 2013)



Kuva 5 GA2000 Plus -analyysilaitte  
(Kuva Anna Kaivola 2013)

#### 8.4 Jatkuva toiminen biokaasulaitteisto

Jatkuvatoimisuus tarkoittaa sitä, että biokaasutuslaitteistoon lisätään ja sieltä poistetaan tietty määrä materiaalia halutun ajan kuluessa. Jatkuvatoimisessa laitteistossa on lisäksi sekoitin, jotta biokaasuprosessi pysyy tasaisena ja tuottavampana pidempää. Jatkuvatoimisen laitteiston antamat tulokset ovat realistisempia kuin panoskokeiden tulokset, koska sillä voidaan simuloida täydenmittakaavan biokaasulaitosta, jota panoskokeilla ei voi tehdä.

#### 8.4.1 Kooreaktori

Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikön käytössä oleva jatkuvatoiminen laitteisto koostuu neljästä lasisesta reaktorista, jotka ovat tilavuudeltaan 10 l, sekä niihin kiinnitettävistä teräskansista (Kuva 6). Kansissa on kaksi venttiiliä kaasunkeräystä varten sekä kaksi läpivientiä reaktoriin, joista näytteitä voidaan lisätä ja poistaa reaktoreihin. Kaasunkeräysspussit yhdistetään PVC-letkuilla kannen venttiileihin. Laitteistossa on lisäksi sekoitin, jonka läpivienti on toteutettu vesilukkoperiaatteella. Tällöin sekoitus on tasaisempaa, laitteisto pysyy ilmatiiviinä ja pussien täytyessä vesilukko toimii ylipaineventtiilinä. Reaktoreiden lämmitys toimii vesikiertoisilla lämmitysmatoilla, joiden toimintaa seurataan yhteen reaktoriin asetetun lämpötila-anturin avulla.



Kuva 6 Kooreaktori  
(Kuva Anna Kaivola 2013)

#### 8.4.2 Kooreaktorin toiminta ja alkutoimenpiteet

Reaktorit täytettiin niin, että reaktorit 1 ja 2 sisälsivät tehtaan A primääri- ja biolietettä, sekä ympäristöbiokaasutuksen tehokkaampaa käynnistymistä varten. Reaktoreissa 3 ja 4 oli vastaavasti tehtaan B primääri- ja biolietettä sekä ympäristöbiokaasutusta. Liitteenä olevassa taulukossa näkyy kuhunkin reaktoriin punnitut näytemäärät (Liite 2).

Tämän jälkeen reaktoreihin voitiin kiinnittää tulpat ja ilmaruuvit sekä täyttää vesilukko glykolilla. Lämmitystermostaatti säädettiin noin 40 °C:een, jotta reaktoreiden sisälämpötila pysyy kokeen ajan mesofiilillä lämpötila-alueella eli n. 35 - 37 °C. Laitteiston sekoitin säädettiin pyörimään joka tunti minuutin ajan tasaisen toiminnan varmistamiseksi.

#### 8.4.3 Prosessin ylläpito

Jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston toimiminen edellyttää, että reaktoriin syötetään tasaisin väliajoin tietty määrä näytettä ja otetaan saman verran pois. Tässä kokeessa lisäys ja poisto suunniteltiin teh-

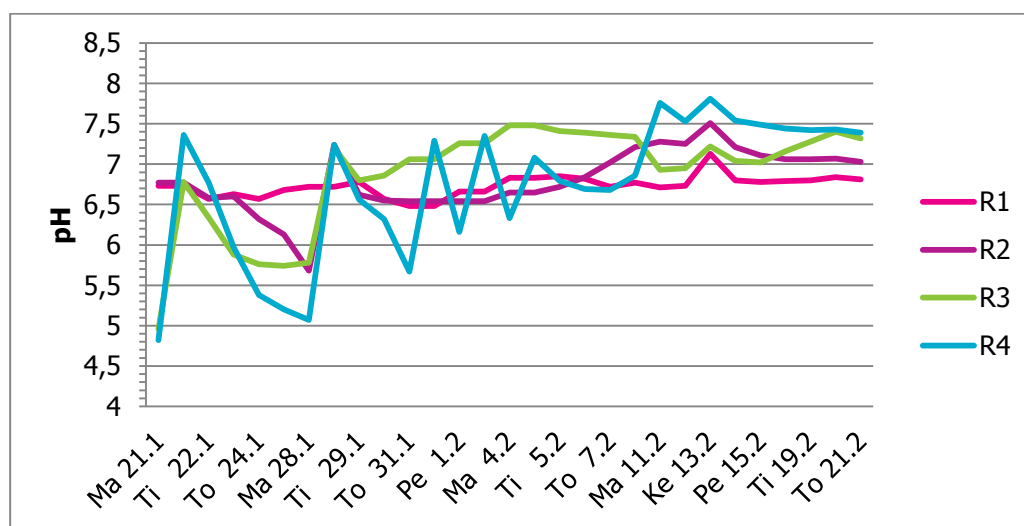
täväksi kolme kertaa viikossa, maanantaisin, keskiviikkoisin ja perjantaisin. Tällöin näytteitä vaihdetaan 10 % reaktorin tilavuudesta eli 1,2 kg, josta primäärilietteen osuus on 70 % eli 840 g ja biolietteen osuus 30 % eli 360 g. Tähän 70:30 suhteeseen päädyttiin sen takia, että molempien tehtaiden lietteet olivat hyvin laimeita, jolloin syötteen laskenta perustui orgaanisen aineen määrään ja viipymään, joka kokeessa oli 21 vrk.

Näytemassan vaihtaminen tapahtui siten, että ennen poistoa reaktoreiden sekoitin asetettiin käsissäädölle ja sen annettiin pyöriä minuutin ajan, jotta massa olisi hyvin sekoittunut. Tämän jälkeen käsittelyjäännöstä poistettiin 1,2 kg alipaineistetun letkusysteemin avulla. Vastaavasti uutta näytettä punnittiin sama määrä ja se syötettiin suppilon avulla näyteputkeen.

#### 8.4.4 Prosessin tilan seuranta

##### pH-arvo

Lähes heti kokeen alussa huomattiin, että reaktoreiden 3 ja 4 pH-arvot olivat laskeneet hyvin alas, jolloin ne olivat alle viiden. Tämän takia näytteiden syöttäminen reaktoreihin keskeytettiin, koska arveltiin, että reaktorit olivat menneet hapoille luultavasti liian nopean kuormittamisen seurauksena. Reaktoreiden tilan annettiin stabiloitua viikonlopun ajan, mutta pH-arvojen pysyessä matalina reaktoreihin päätettiin syöttää natriumhydroksidia (NaOH) aina tarpeen vaatiessa eli aina, kun reaktoreiden pH laskee liian alas. Natriumhydroksidilla on myös biokaasutusta tehostava vaikutus. Seuraavassa kuvaajassa on esitetty kuukauden ajalta pH-arvojen vaihtelua jokaisen reaktorin osalta. Kuviossa 9 oleva selvä piikkimäinen pH-arvon nousu tarkoittaa, että reaktoriin on lisätty natriumhydroksidia.



Kuvio 9 Reaktoreiden (R1 - R4) pH-arvot ajalta 21.1 - 21.2.2013

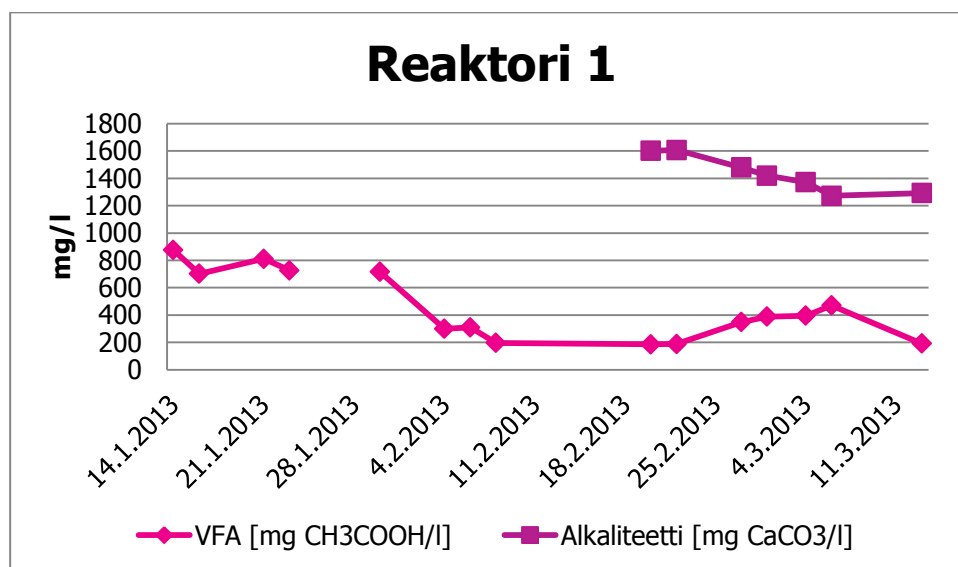
Reaktori 1 oli ainut koesarjan reaktoreista, jonka pH-arvo pysyi kokeen ajan suunnilleen stabiilina, pysyen pH 6,5 - 7 välillä. Reaktorin 4 osalta pH-arvoa joutui useampaan kertaan korjaamaan NaOH:n avulla, mutta kuvaajasta huomataan, että jokaisen NaOH-lisäyksen jälkeen pH ei pudonnut enää yhtä paljon kuin edellisillä kerroilla ja lopulta 4. reaktorinkin pH asettui vakaaksi.

### Alkaliteetti ja haihtuvat rasvahapot (VFA)

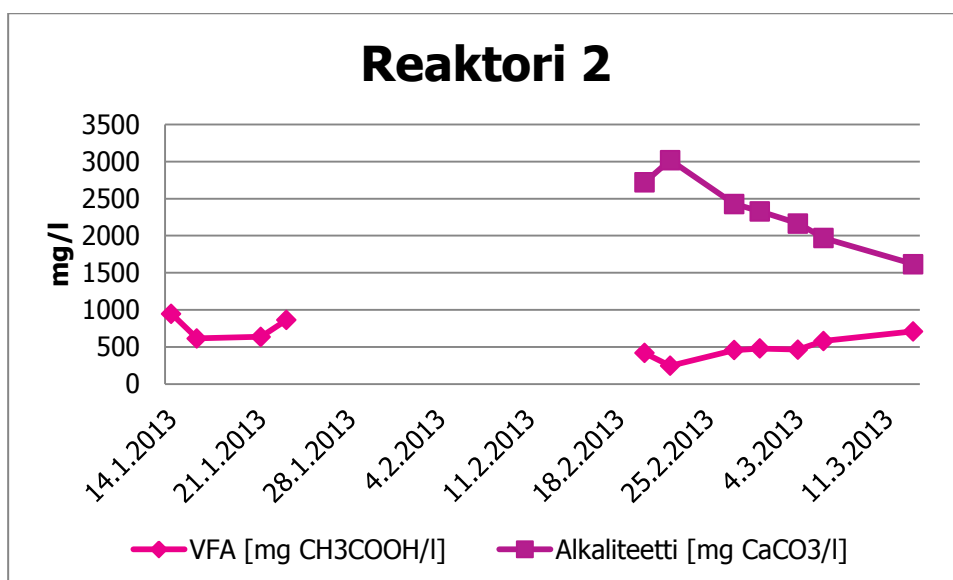
Lietteiden syötön yhteydessä tehtiin poistettavasta näytteestä VFA-titraus, jotta saatiin selville prosessin tilanne haihtuvien rasvahappojen osalta. Kokeen alussa tehtaan A lietteitä sisältävien reaktoreiden 1 ja 2 (Kuviot 10 ja 11) haihtuvien rasvahappojen arvot olivat matalammalla kuin tehtaan B vastaavien reaktoreiden (Kuviot 12 ja 13). Reaktoreissa 1 ja 2 VFA-arvot olivat kokeen aikana suu- rimmillaan noin 900 mg/l, kun taas reaktoreiden 3 ja 4 VFA-arvot eivät laskeneet reilun viikon aika- na, kun reaktorit jätettiin syöttämättä. Kuvioissa 12 ja 13 näkyvä piste 25. tammikuuta kohdalla tar- koittaa, että reaktoreista poistettiin normaali määrä näytettä, mutta tilalle lisättiin vettä, jotta reaktio- reiden kuormitusta saataisiin pienennettyä.

Alkaliteetti-määritys aloitettiin kokeen loppupuolella, 20. helmikuuta, jotta pystyttiin laskemaan VFA/Alkaliteetti -suhde. Tämän avulla prosessin tilaa pystytään seuraamaan tarkemmin ja havaitse- maan muutokset, ennen kuin prosessi menee hapoille. Prosessi toimii stabiilisti, mikäli VFA/Alkaliteetti -suhde on noin 0,3 ja tätä ylemmät arvot kuvaavat, että prosessi on ylikuormittunut, jolloin syöttämistä on syytä vähentää. Kuviossa 14 huomataan, että tehtaan B lietteiden VFA/Alkaliteetti -suhde pysyi alhaisena, mutta tehtaan A lietteiden suhdeluku nousi lähelle raja- arvoa, ja reaktori 2:n suhdeluku ylitti kokeen lopussa suositellut 0,3 -arvon. Alkaliteetin kohdalla korkeat arvot ovat hyviä, koska se kuvaa, että prosessi on itsepuskuroituva. Suositeltava alkaliteetti- taso on noin 3 000 - 5 000 mg CaCO<sub>3</sub>/l. (Lund 2010, 16 - 17; Kannisto 2009, 24.) Kuvioista 10 - 13 huomataan, että kaikkien reaktorioiden alkaliteetti laskee kokeen aikana, mikä viittaa häiriötilaan pro- sessissa.

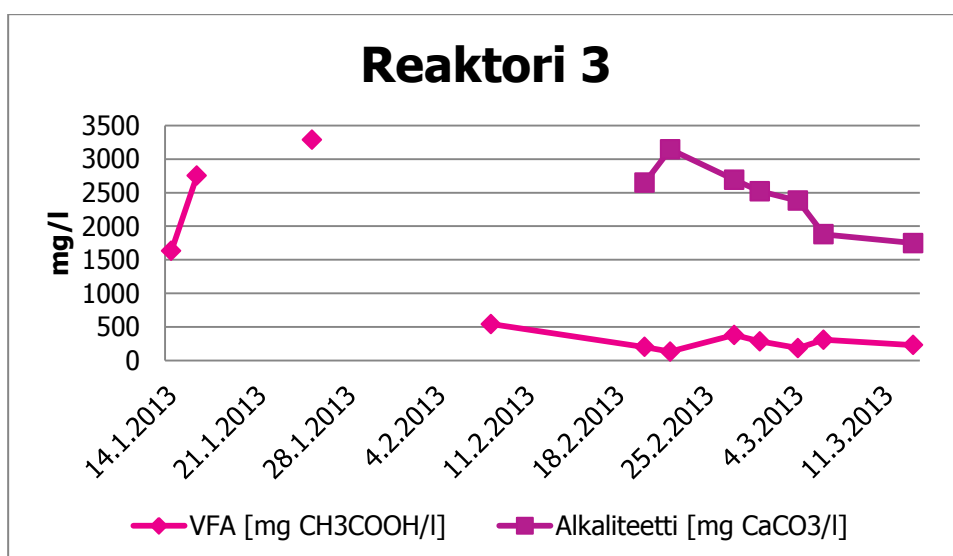
Tehtaan B reaktoreiden 3 ja 4 pH-arvojen pysyessä matalina, reaktoreiden tilan yritettiin antaa itse stabiloitua, jolloin reaktoreita ei syötetty tänä aikana. Tämän seurauksena reaktoreiden VFA-arvot tippuivat lopulta alle 500 mg/l.



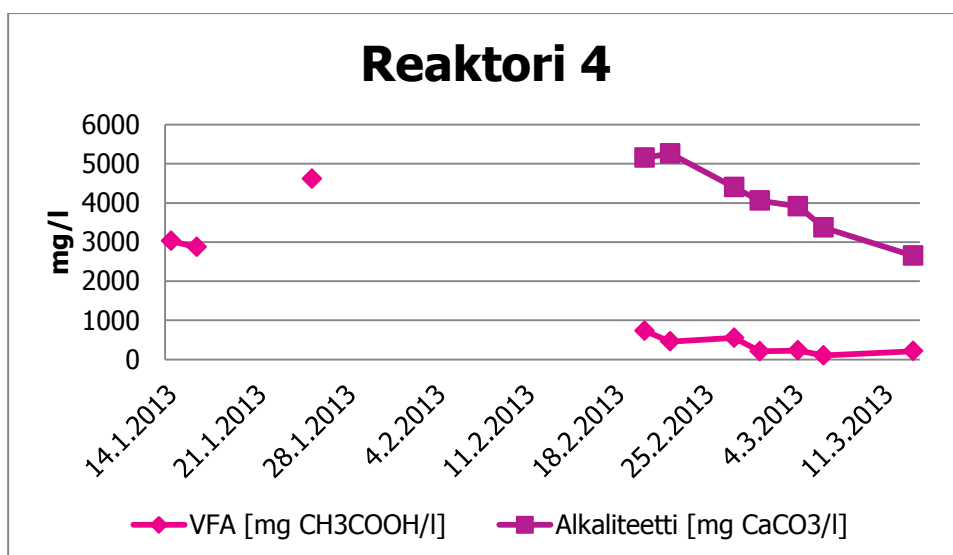
Kuvio 10 Reaktori 1:n VFA- ja alkaliteettipitoisuudet



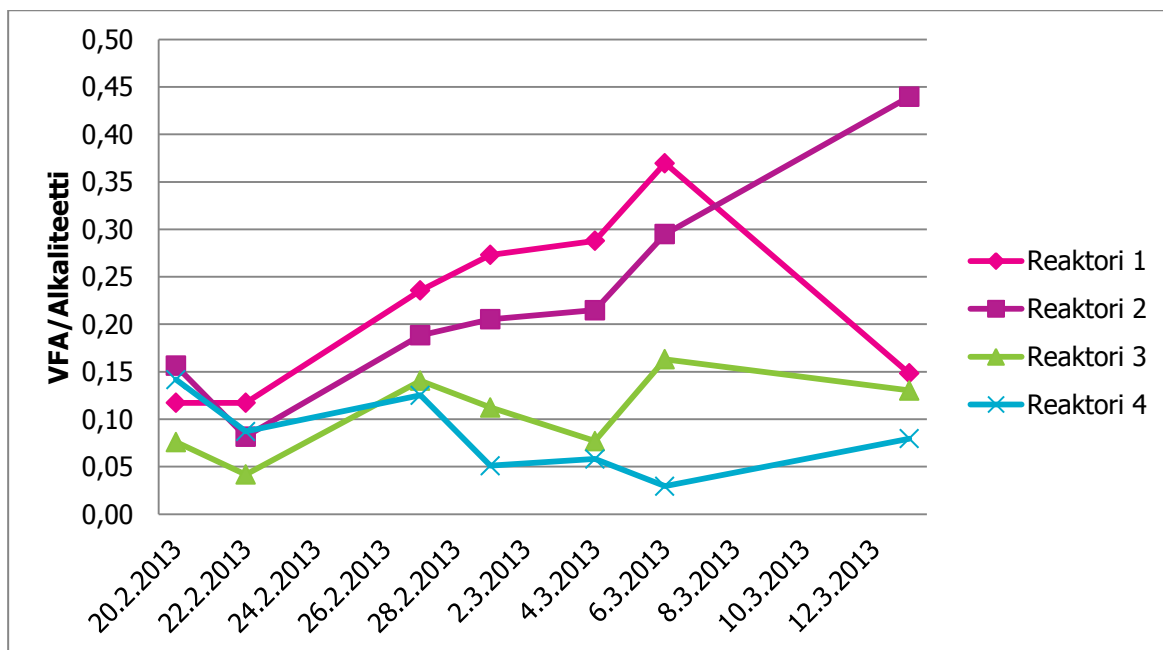
Kuvio 11 Reaktori 2:n VFA- ja alkaliteettipitoisuudet



Kuvio 12 Reaktori 3:n VFA- ja alkaliteettipitoisuudet



Kuvio 13 Reaktori 4:n VFA- ja alkaliteettipitoisuudet

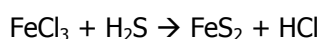


Kuvio 14 Reaktoreiden (R1-R4) VFA/Alkaliteetti -suhde

### Rikkivety ( $H_2S$ )

Kokeen aikana huomattiin, että jokaisessa reaktorissa vallitsi hyvin korkea rikkivetypitoisuus, joka on biokaasuprosessia inhihoiva tekijä. Kokeessa käytetty analyysilaitte pystyi mittaamaan vain alle 200 ppm:n pitoisuuksia, minkä takia laitteeseen asennettiin ulkoinen rikkivetyanturi, jonka mittausalue ulottui 5 000 ppm asti. Anturi antoi tehdas A:n näytteille tulokseksi noin 5 000 ppm, mikä voi tarkoittaa, että oikea tulos voi olla mahdollisesti tätä suurempikin. Tehdas B:n näytteiden rikkivetypitoisuus oli puolestaan noin 3 500 ppm.

Näytteiden korkea rikkivetypitoisuus johtuu siitä, että metsäteollisuuden lietteet sisältävät runsaasti rikkivetyä, koska sellun valmistusprosessissa käytetään rikkipitoisia yhdisteitä. Tätä ongelmaa yritettiin ratkaista syöttämällä rautakloridia reaktoreihin, koska sen on havaittu hajottavan rikkivetyä alla olevan kaavan mukaisesti rautasulfidiksi ja suolahapoksi:



Rautakloridin syötöllä tehdas A:n reaktoreiden korkea rikkivetypitoisuus ei lähtenyt laskuun, mutta tehdas B:n reaktoreiden pitoisuus putosi reaktori 3:ssa jopa väliaikaisesti nolleen ja 4. reaktorinkin kohdalla noin 400 ppm.



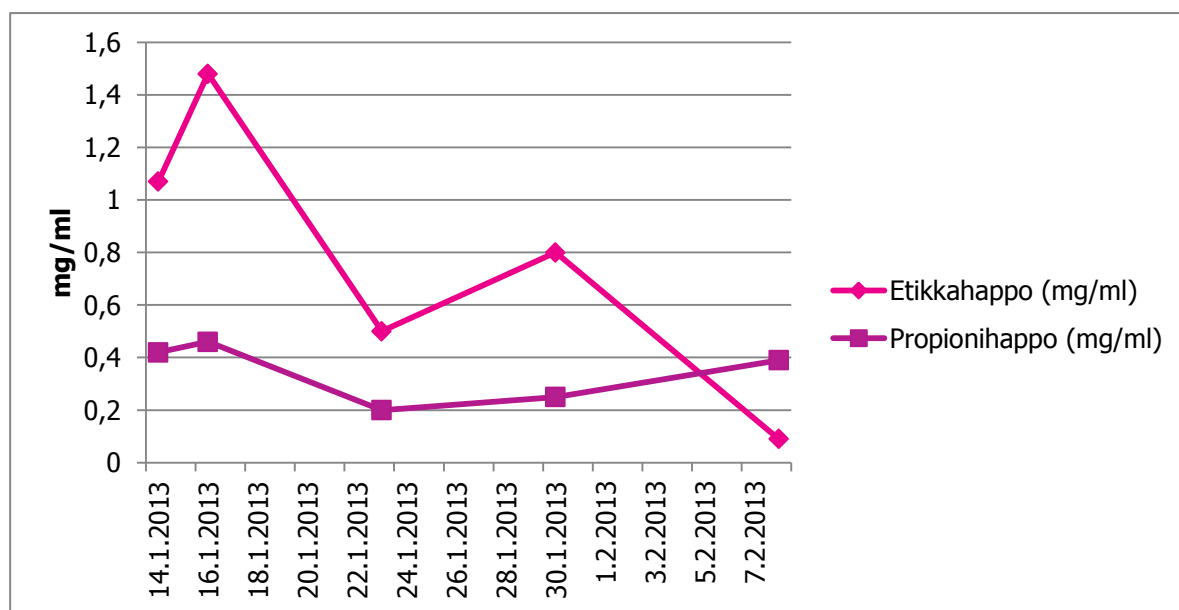
## Happoanalyysi

Itä-Suomen yliopisto teki näytteille tarkemmat happoanalyysit, jotta tiedettiin kuinka paljon ja missä suhteessa esimerkiksi etikkahappoa ja propionihappoa lietteet sisälsivät ja paljonko niitä prosessissa muodostuu.

Haihtuvien rasvahappojen pitoisuuden vaikutuksia metaanintuottoon ja metanogeenisten bakteerien määrään tehdyssä tutkimuksessa (Wang 2009) huomattiin, että metanogeenisten bakteerien toiminta ei heikentynyt, kun etikkahapon ja voihamon pitoisuudet olivat 2 400 ja 1 800 mg/l. Puolestaan propionihappo aiheutti inhibiitiota prosessiin, kun sen pitoisuus ylitti 900 mg/l. Tutkimuksissa havaittiin, että metaanintuotto oli suurimmillaan, kun etikkahapon, voihamon ja propionihapon pitoisuudet olivat 1 600, 1 800 ja 300 mg/l.

Liuksian diplomityössä (2009) todetaan, että hyvin toimivassa mädätysprosessissa etikkahappopitoisuus on keskimäärin 200 - 400 mg/l, mutta tätä tärkeämpi on seurata haihtuvien rasvahappojen pitoisuutta ajan suhteen. Tehokkaasti toimivassa mädätysprosessissa VFA-arvo pysyy tasaisena koko prosessin ajan. Esimerkiksi kuvioista 10 - 13 huomataan, että kokeen lopussa VFA-arvot pysyvät tasaisesti keskimäärin 200 - 500 mg/l välillä.

Puolestaan yksi parametri biokaasuprosessin toimivuudesta on etikkahapon ja propionihapon suhde. Mikäli tämä suhde on 1:1, niin prosessi voi huonosti ja propionihappopitoisuuden noustessa sillä on suoraan inhiboiva vaikutus biokaasuprosessiin (Janhunen 2013). Kuviossa 15 on esitetty reaktori 3:n näytteestä tehty happotutkimus, josta huomataan, että heti kokeen alussa etikkahappopitoisuus on ollut korkeimmillaan 1 500 mg/l, mutta pudonnut nopeasti 500 mg/l. Samalla propionihappopitoisuus on alkanut kasvamaan ja lopulta sen pitoisuus on ylittänyt etikkahappopitoisuuden.



Kuvio 15 Reaktorin 3:n etikka- ja propionihappopitoisuudet

## 9 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

### 9.1 Kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet

Näytteille määritettiin kokeen alussa ja lopussa standardin SFS 3008 mukaiset kuiva- aineen ja orgaanisen aineen pitoisuudet, jotka on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5 Panoskokeiden näytesarjojen kuiva-aineen ja orgaanisen kuiva-aineen pitoisuudet kokeen alussa ja lopussa.

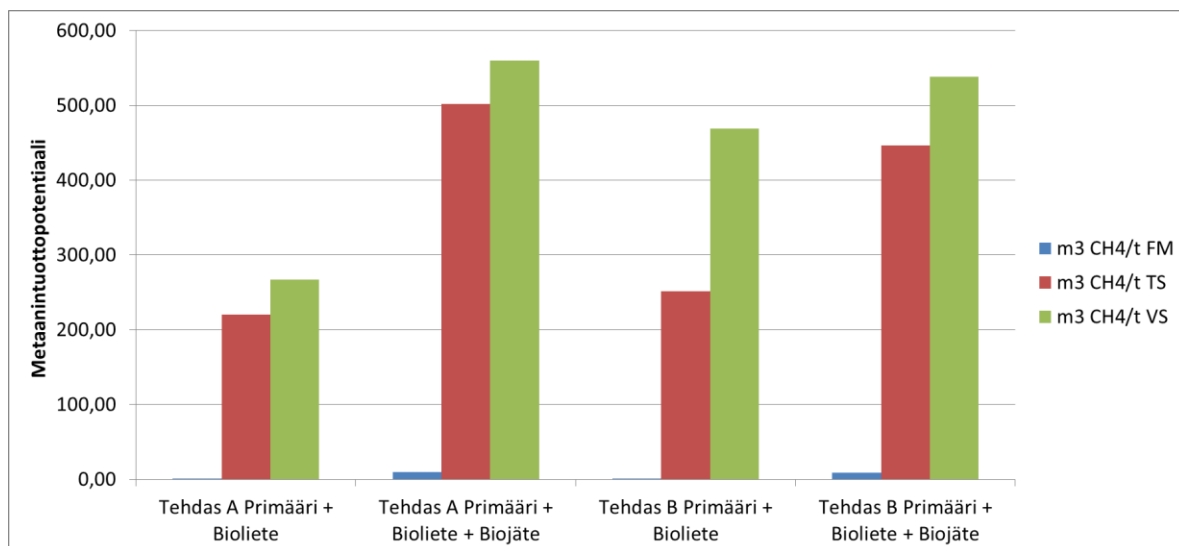
Näytesarja	TS-pitoisuus (%)		VS-pitoisuus (%)	
	Alku	Loppu	Alku	Loppu
Tehdas A Primääri + Bioliete	0,73	0,59	0,60	0,38
Tehdas A Primääri + Bioliete + Biojäte	21,98	1,49	19,81	0,96
Tehdas B Primääri + Bioliete	0,96	0,59	0,52	0,27
Tehdas B Primääri + Bioliete + Biojäte	22,21	1,70	19,73	1,04

### 9.2 Biokaasupanoskokeiden tulokset

Biokaasupanoskokeet aloitettiin keskiviikkona 9.1.2013 ja ne saatiin päätökseen torstaina 14.2.2013. Kokeessa oli viisi erillistä sarjaa, joista jokaisesta tehtiin kolme rinnakkaista koetta. Taulukossa 6 on esitetty kuinka paljon näytteet ovat tuottaneet metaania tuoremassaa, kuiva-ainetta ja orgaanista kuiva-ainetta kohden. Tuloksista on vähennetty ympin tuottama osuus.

Taulukko 6 Lietteiden metaanintuottopotentialit tuoremassaa (FM), kuiva-ainetta (TS) ja orgaanista kuiva-ainetta (VS) kohti.

Näyte	Metaanintuottopotentiali		
	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t FM	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t TS	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS
Tehdas A Primääri + Bioliete	0,57	220,36	267,36
Tehdas A Primääri + Bioliete + Biojäte	10,10	501,76	559,74
Tehdas B Primääri + Bioliete	0,99	251,50	469,34
Tehdas B Primääri + Bioliete + Biojäte	8,64	446,56	538,66



Kuvio 16 Lietteiden metaanintuottopotentiaalit tuoremassaa, kuiva-ainetta ja orgaanista kuiva-ainetta kohti

Tuloksista huomataan, että biojätteen anaerobinen hajotus yhdessä metsäteollisuuden lietteiden kanssa lisää metaanintuottopotentiaalia. Varsinkin tehtaan A tapauksessa biojätteen lisäys nosti metaanintuottoa merkittävästi. Tehtaan B kohdalla nousu oli maltillisempaa, mutta niissäkin huomaa kaasuntuoton tehostumista. Biojätteellä on voinut olla prosessia tehostava vaikutus sen takia, että se tuo hajotusprosessiin tarvittavia ravinteita, joita metsäteollisuuden lietteet sisältävät liian vähän tai väärässä suhteessa.

Taulukkoon 7 on koottu panoskokeiden aikana mitattuja korkeimpia metaanipitoisuuksia ja niiden vastaavat hiilidioksidi- ja happipitoisuudet. Yleisesti voidaan todeta, että jokaisessa sarjassa metaanipitoisuus oli keskimäärin 60 - 73 %, hiilidioksidipitoisuus 25 - 45 % ja happipitoisuus 0,4 - 2 %, mikä tarkoittaa, että biokaasuprosessi toimi tehokkaasti. Esimerkiksi kaatopaikoilta kerättävä kaatopaikkakaasu sisältää keskimäärin 40 - 60 % metaania ja 40 - 50 % hiilidioksidia. (Hirvonen 2010, 5.)

Taulukko 7 Biokaasupanoskokeiden korkeimmat metaanipitoisuudet ja niitä vastaavat hiilidioksidi- ja happipitoisuudet

Näyte	Metaani (%)	Hiilidioksidi (%)	Happi (%)
<b>Tehdas A Primääri + Bioliete</b>	63,4	29,4	1,1
<b>Tehdas A Primääri + Bioliete + Biojäte</b>	73,4	26,2	0,4
<b>Tehdas B Primääri + Bioliete</b>	68,3	30,0	0,8
<b>Tehdas B Primääri + Bioliete + Biojäte</b>	72,9	25,8	0,6

Kun verrataan saatuja metaanintuottopotentiaaleja muihin syötteisiin (Taulukko 8, Latvala 2009) huomataan, että biojätettä sisältävät sarjat vastaavat metaanintuottopotentiaaleiltaan tuoremassaa kohti lähinnä muita jätevesilietteitä tai lantaa. Muissa sarjoissa, jossa oli vain lietteitä, tuottopotentiaalit jäivät vain alle  $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$  tuoremassaa kohti. Biojätettä sisältävien sarjojen metaanintuottopotentiaalit orgaanista ainesta kohden olivat noin  $540 - 560 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ , jolloin ne vastaavat hyvin biojätteen ja jätevesilietteiden tuottopotentiaaleja.

Taulukko 8 Esimerkkejä eri syötteiden metaanintuottopotentiaaleista (Latvala 2009, 23)

Syöte	Metaanintuottopotentiaali	
	$\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{tVS}$	$\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{tFM}$
Teurastamojäte	570	150
Biojäte	500-600	100-150
Energiakasvit	300-500	30-150
Jätevesiliete	310-640	8-16
Lanta	100-400	7-20

### 9.3 Jatkuvat toimisen biokaasulaitteiston tulokset

Koe aloitettiin torstaina 10.1.2013 ja se keskeytettiin kokeen aikana ilmenneiden ongelmien seurauksena maanantaina 18.2.2013. Kokeesta ei saatu tänä aikana luotettavia tuloksia metaanintuoton osalta, koska kaasunkeräyspusseihin ei muodostunut tarpeeksi kaasua kokeen aikana.

Alla olevaan taulukkoon on koottu optimaalisia prosessiparametreja (Latvala 2009, Lund 2011, Liuk-sia 2009), joita ilmenee hyvin toimivassa biokaasuprosessissa.

Taulukko 9 Optimaalisia parametreja biokaasutukselle

Parametri	Optimiarvo
pH	6,8 - 7,4
Lämpötila (°C)	35 - 38
VFA (mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$ )	48 - 480
Alkaliteetti (mg $\text{CaCO}_3/\text{l}$ )	3 500 – 5 000
VFA/Alkaliteetti -suhde	< 0,30
Metaani (%)	55 - 75
Hiilidioksidi (%)	25 - 45
Happi (%)	< 0,5
Rikkivety (ppm)	10 - 40

Kun tarkastellaan kokeen aikana ilmenneitä pH-arvoja, niin vain reaktori 1 pysyi kokeen ajan optimaalisella pH-alueella. Reaktoreiden syötön keskeyttämisellä ja natriumhydroksidin lisäyksellä muutkin reaktorit tasaantuivat kuukauden aikana optimaal alueelle. Lämpötila pysyi kokeen aikana tasaisesti noin 36 °C:ssa, paitsi maanantaina 25.2.2013 huomattiin, että reaktoreiden lämpötila oli viikonlopun aikana pudonnut 20 °C:een, johtuen vesikierrossa olleesta vajeesta. Tästä syystä reaktoreihin on voinut ilmalukon kautta päästä happea ja biokaasuprosessi on saattanut entisestään häiriintyä.

Reaktoreiden VFA-arvot vaihtelivat alussa noin 1 000 - 4 000 mg/l välillä, mutta tasaantuivat lähes optimaal alueelle kokeen loppupuolella. Alkaliteettititraukset osoittivat, että syötteillä on heikko puskuri-kyky, koska vain reaktori 4:n alkaliteetti oli kokeen alussa optimiarvossa. Prosessissa ollut häiriötila kuvaa kuitenkin se, että kaikkien reaktorien alkaliteetti laski loppua kohti. Koska alkaliteettititraukset aloitettiin vasta 20.2.2013, niin kokeen alkupuolelta ei ole tietoa prosessin toimivuudesta VFA/Alkaliteetti -suhteen osalta. Kuviosta 14 huomataan, että tehtaan B reaktoreiden (3 ja 4) VFA/Alkaliteetti -suhde pysyy hyvällä tasolla, vaikka reaktoreihin syötetään kolme kertaa viikossa. Puolestaan tehtaan A reaktorien suhdeluku nousee syöttöjen yhteydessä ja reaktori 2:n suhdeluku ylittää kokeen lopuksi suositellun raja-arvon. Reaktori 1:stä syötetään samalla syklillä kuin muitakin reaktoreita, mutta sen kohdalla VFA/Alkaliteetti -suhde putoaa itsestään 0,15:een, kun suhdeluku ylittää raja-arvon.

Kun verrataan biokaasun koostumuksen parametreja, niin parhaimmillaan reaktori 3:n tuottama biokaasu sisälsi 84,2 % metaania, kun hiilidioksidipitoisuus oli 19,2 % ja happipitoisuus 0,8 %. Samalla kuitenkin rikkivetypitoisuus oli lähes 3 000 ppm. Korkea rikkivetypitoisuus ilmeni jokaisessa reaktorissa, millä on merkitystä metaanin tuottomääriin.

Reaktori 4:n kohdalla päädyttiin siihen tulokseen, että reaktori vuotaa jostain kohdin ja tämän takia reaktorista tehdyt mittaukset eivät ole luotettavia. Kaasunkeräyspussiin ei kertynyt yhtään biokaasua kokeen aikana, vaikka reaktorin kannessa olevista venttiileistä mitattiin kaasunkoostumuksen sisältävän lähes 70 % metaania.

## 10 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia laboratoriomittakaavan biokaasukokeiden avulla kahden massa- ja paperitehtaan jätevedenpuhdistuksessa muodostuvien primääri- ja biolietteiden kaasuntuottavuuksia. Työssä hyödynnettiin Savonian-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikön jatkuvatoimista biokaasulaitteistoa sekä tehtiin biokaasupanoskoe, jossa tutkittiin biojätteen ja metsäteollisuuden lietteiden yhteiskäsittelyn vaikutusta metaanintuottopotentiaaleihin.

Metsäteollisuuden lietteet voivat olla hankalia käsitellä anaerobisesti niiden korkean ligniinipitoisuuden takia ja varsinkin primäärilietteet sisältävät vähän ravinteita. Biokaasupanoskokeesta saadut tulokset kuitenkin osoittavat, että biojätteen lisäys anaerobiseen hajotusprosessiin yhdessä lietteiden kanssa lisää metaanintuottopotentiaalia. Tämä voi johtua siitä, että biojäte tuo hajotusprosessiin tarvittavia ravinteita.

Jatkuvatoimisen biokaasulaitteiston kanssa koettiin paljon vastoinkäymisiä, eikä kokeesta saatu luotettavia tuloksia reilun kahden kuukauden aikana. Heti kokeen alussa huomattiin, että reaktoreiden pH-arvot putosivat jyrkästi, minkä ajateltiin johtuvan liian nopeasta prosessin kuormituksesta. Tämän takia reaktoreiden syöttö keskeytettiin joksikin aikaa ja reaktoreihin lisättiin natriumhydroksidia, jotta pH-arvot nousisivat nopeammin ja metaanintuotto tehostuisi. Tällä oli kuitenkin vaikutusta jatkuvatoimisen laitteiston toimintaan, koska eri reaktoreihin jouduttiin syöttämään materiaalia epätaisella syklillä. Korkean kuormituksen myötä haihtuvia rasvahappoja, erityisesti etikkahappoa ja propionihappoa esiintyi lietteistä tehdyissä analyyseissä runsaasti. Tämän lisäksi lietteille tehdyt alkaliteettititraukset osoittivat, että kaikkien reaktoreiden syötteillä oli heikko puskurikyky ja alkaliteetin arvo putosikin kokeen aikana jokaisessa reaktorissa. Jo kaikki nämä asiat viittasivat siihen, että prosessi oli häiriötilassa ja metaanintuottajabakteerien toiminta oli pysähtynyt.

Lisäksi kaasuanalysoinnin yhteydessä havaittiin, että muodostunut biokaasu sisälsi huomattavan paljon rikkivetyä, jolla on tutkitusti metaanintuottoa inhihoiva vaikutus. Tätä ongelmaa yritettiin korjata lisäämällä reaktoreihin rautakloridia, mutta ennalta sovitun aikataulun puitteissa sopivaa rautakloridin annostelua ei ehditty määrittämään.

Tulevia jatkuvatoimisia biokaasukokeita varten kokeen aloitus kannattaa tehdä hitaammalla syklillä, eli lisätä syötettä harvemmin biokaasureaktoreihin, jotta mikrobit ehtivät hajottamaan orgaanista ainesta pidempään eikä metanogeenisten bakteerien toiminta häiriinny liian korkeasta happopitoisuudesta. Lisäksi VFA- ja alkaliteettititrauksia on syytä tehdä kokeen alusta lähtien, jotta nähdään toimiiko prosessi tehokkaasti ja havainnoidaan prosessissa tapahtuvat muutokset jo hieman etukäteen. Myös mahdollista ravinnelisyystä ja lietteiden esikäsittelyä on hyvä harkita, jos biokaasutetaan pelkästään metsäteollisuuden lietteitä.

## LÄHTEET

- Ahonen, S. 2010. *Alueellinen liikennebiokaasun tuotanto, siirto ja jakelu – esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta*. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Ympäristötiede ja -teknologia. Pro gradu -tutkielma. [viitattu 20.3.2013]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-201008122457>
- Al Seadi, T., Finsterwalder, T., Janssen, R., Köttner, M., Prassl, H., Rutz, D. & Volk, S. 2008. *Biogas Handbook*. Tanska: University of Southern Denmark Esbjerg. [viitattu 14.2.2013]. Saatavissa: <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>
- Anttonen, K. 2012. *Biokaasu pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotannossa*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiatekniikan koulutusohjelma. Energiatekniikan kandidaatintyö. [viitattu 10.3.2013]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201101141053>
- Arnold, M., Carpen, L., Kajolinna, T., Kangas, A., Koskinen, P., Liuksia, S., Lund, C. & Ryhänen, T. 2011. *Energiatehokas lietteenkäsittely*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. [viitattu 10.3.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=128291&lan=fi>
- Chen, Y., Cheng, J. & Creamer, K. 2007. *Inhibition of anaerobic digestion process: A review*. North Carolina State University, USA. [viitattu 5.2.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407001563>
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY*. 2008. Euroopan unionin virallinen lehti. [viitattu 23.2.2013]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:FI:PDF>
- Harvestia, Syksy 2011.[verkkolehti] *Kartonki on tulevaisuuden ala*. [viitattu 14.2.2013]. Saatavissa: <http://www.harvestia.fi/binary/file/-/id/3/fid/99>
- Helsingin Seuden Ympäristöpalvelut, 2011. *Pääkaupunkiseuden biojätteen koostumus, Kotitalouksien ja palvelutoimialojen erilliskerätyn biojätteen lajittelututkimus*. Helsinki [viitattu 12.3.2013] Saatavissa: [http://www.hsy.fi/tietoahsy/Documents/Julkaisut/6\\_2011\\_Paakaupunkiseudun\\_biojatteen\\_koostumus.pdf](http://www.hsy.fi/tietoahsy/Documents/Julkaisut/6_2011_Paakaupunkiseudun_biojatteen_koostumus.pdf)
- Hirvonen, J. 2010. *Kaatopaikkakaasun puhdistaminen ja analysointimenetelmät*. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, Uusiutuvan energian maisteriohjelma, Fysiikan laitos. Pro gradu -tutkielma. [viitattu 11.4.2013] Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/dspace/handle/123456789/24571>
- Huttunen, M. & Kuittinen, V. 2012. *Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 15*. Joensuu: Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 8. [viitattu 15.3.2013]. Saatavissa: <http://www.biokaasuyhdistys.net/media/Biokaasulaitosrekisteri2011.pdf>
- Janhunen, Maarit. 2013. *Sähköpostikeskustelu*. 22.3.2013.
- Jermakka, J., Laine-Ylijoki, J. & Wahlström M. 2012. *Taustamuistio kaatopaikoista annetun valtioneuvoston päätöksen muuttamista varten*. Helsinki: Ympäristöministeriön raportteja 11/2012 [verkkojulkaisu]. [viitattu 21.2.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=136851&lan=fi>
- Kallio, N., Liukkonen, T., Mäkinen, M., Rautiala, S. & Reiman, M. 2010. *Työympäristön mikrobiologisten riskien hallinta massan ja paperin valmistuksessa*. Helsinki: Metsäteollisuus ry [verkkojulkaisu]. [viitattu 14.2.2013]. Saatavissa: <http://www.metsateollisuus.fi/Infokortit/mikrobiologistenriskienhallintamassanpaperinvalmistuksessa/Sivut/default.aspx>
- Kannisto, L. 2009. *Biojäte-lieteseoksen biokaasutus kooreaktorilla*. Visamäki: Hämeen ammattikorkeakoulu, Bio- ja elintarviketekniikka. Opinnäytetyö. [viitattu 5.3.2013]. Saatavissa: [http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/4696/Raportti\\_1.pdf?sequence=3](http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/4696/Raportti_1.pdf?sequence=3)

Koistinen, Kari. 2013. *Sähköpostikeskustelu*. 7.3.2013.

Kukkonen, M. 2012. *Happigeneraattorin käyttö esi-ilmastuksessa Savon Sellun jätevedenpuhdistamolla*. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu, Tekniikan ja liikenteen ala, Ympäristöteknologia. Opin-  
näytetyö [viitattu 5.3.2013]. Saatavissa:

[http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41826/Kukkonen\\_Minna.pdf?sequence=1](http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41826/Kukkonen_Minna.pdf?sequence=1)

Latvala, M. 2009. *Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä*. Helsinki: Suomen ympä-  
ristökeskus [verkkajulkaisu]. [viitattu 23.2.2013]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=106756&lan=FI>

Lehto, T. & Ekholm, E. 2001. *Suomalaisten kompostointilaitosten toimivuus ja tehostaminen*. Jätelai-  
tosyhdistys ry, 1. Väliraportti, Osa A. [viitattu 29.3.2013] Saatavissa:

[http://www.jly.fi/komplait\\_A.pdf](http://www.jly.fi/komplait_A.pdf)

Lehtomäki, A., Luostarinen, S., Paavola, T. & Rintala, J. 2007. *Biokaasusta energiaa maatalouteen -  
raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet*. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen  
tiedonantoja 85. Jyväskylä [viitattu 6.2.2013].

Lohiniva, E., Mäkinen, T. & Sipilä, K. 2001. *Lietteiden käsittely, Uudet ja käytössä olevat tekniikat*.  
Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita. [viitattu 5.3.2013]. Saatavissa:

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2081.pdf>

Lund, C. 2010. *Mesofiilisen ja termofiilisen biokaasutuslaitoksen kuormitusvertailu ja optimointi*. Es-  
poo: Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Kemian ja materiaalitieteiden tiedekunta, Kemian tek-  
niikan koulutusohjelma. Diplomityö. [viitattu 6.2.2013].

Metsäteollisuus ry, 2013. *Metsäteollisuuden ympäristötilastot 2011* [verkkajulkaisu]. [viitattu  
14.3.2013]. Saatavissa:

<http://www.metsateollisuus.fi/Infokortit/ymparistotilastot2011/Documents/Ymp%C3%A4rist%C3%B6tilastot%202011.pdf>

Moring, H. 2012. *Puolikemiallisen sellu- ja kartonkitehtaan lietteen hyötykäyttö*. Lahti: Lahden tiede-  
ja yrityspuisto Oy. [viitattu 16.2.2013]. Saatavissa:

[http://ymparisto.lahtisbp.fi/easydata/customers/ymparisto/files/mabu\\_5124/mabu\\_puolikemiallisen\\_  
sellu\\_ja\\_kartonkitehtaan\\_lietteen\\_hyotykaytto\\_2012.pdf](http://ymparisto.lahtisbp.fi/easydata/customers/ymparisto/files/mabu_5124/mabu_puolikemiallisen_sellu_ja_kartonkitehtaan_lietteen_hyotykaytto_2012.pdf)

Ojanen, P. 2001. *Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat te-  
kijät*. Kouvola: Kaakkois-Suomen ympäristökeskus. [viitattu 14.2.2013]. Saatavissa:  
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=74361>

Pakarinen, T. 2011. *Jätevesipuhdistamon toiminta, Mekaanis-Biologinen puhdistamo*. [viitattu  
10.2.2013]

Pakarinen, Tenho. 2013. *Sähköpostikeskustelu*. 13.3.2013

Pulkkinen, Leena. Jätekuukko Oy 2013. *Sähköpostikeskustelu* 6.3.2013.

Pöyry Environment Oy, 2007. *Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailu-  
kyky -selvitys*. [viitattu 20.3.2013]. Saatavissa: [http://www.sitra.fi/NR/rdonlyres/BFCEC181-4AD7-  
4B1A-B7B6-27045F8280FC/0/Lietteenk%C3%A4sittely.pdf](http://www.sitra.fi/NR/rdonlyres/BFCEC181-4AD7-4B1A-B7B6-27045F8280FC/0/Lietteenk%C3%A4sittely.pdf)

Rättö, M., Siika-Aho, M. & Vikman, M. 2009. *Yhdyskuntajätteen hyödyntäminen biojalostamossa*.  
Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2494. [viitattu 12.3.2013]. Saatavissa:  
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2494.pdf>

Sarkkinen, J. 2012. *Savon Sellu Oy:n lietteen käsittelyn kehittäminen*. Joensuu: Pohjois-Karjalan  
ammattikorkeakoulu, Ympäristöteknologian koulutusohjelma. Ylempi ammattikorkeakoulututkinto.  
[viitattu 20.2.2013]. Saatavissa:

[https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/38866/Sarkkinen\\_Jouko\\_2012\\_01\\_26.pdf?se-  
quence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/38866/Sarkkinen_Jouko_2012_01_26.pdf?sequence=1)



Seppänen, A. 2012. *Jätelain ja -asetuksen käytännön vaikutukset jätteiden energiahyötykäyttöön*. Kuopio: KOKOEKO-seminaari 16.2.2012, Savonia-ammattikorkeakoulu. [viitattu 14.2.2013].

Saatavissa:

[http://portal.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia\\_ja\\_ymparisto/ymparistotekniikka/KOKOEKO/koko\\_eko\\_2012/1%20Jatelainsaadanto\\_Ari%20Seppanen.pdf](http://portal.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia_ja_ymparisto/ymparistotekniikka/KOKOEKO/koko_eko_2012/1%20Jatelainsaadanto_Ari%20Seppanen.pdf)

Silvennoinen, Jukka. 2013. *Sähköpostikeskustelu* 4.3.2013.

Tehtaan A ympäristölupa, 2007. [viitattu 14.2.2013]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=74768&lan=fi>

Tehtaan B ympäristölupa, 2008. [viitattu 14.2.2013]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=78748&lan=fi>

Sura, J-P. 2008. *Erilliskerätyn biojätteen soveltuvuus biokaasun tuotantoon, Laitossuunnitteluun tarvittavien ominaisuuksien määrittäminen Watrec Oy:n pilot -laitteistolla*. Lahti: Lahden ammattikorkeakoulu, Ympäristöteknologian koulutusohjelma, Ympäristöbiotekniikka. Opinnäytetyö. [viitattu 10.3.2013]. Saatavissa: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12092/2008-05-13-08.pdf?sequence=1>

Taherzadeh, M. & Karimi, K. 2008. *Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review*. Ruotsi: School of Engineering, University of Borås. [viitattu 5.2.2013].

Saatavissa: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2635757/>

Torvinen, E. *Ilmastusaltaiden mikrobiologinen laatu yhdyskuntajätevesipuhdistamoilla*. Kuopio: Kuopion yliopisto, ympäristötieteen laitos. [viitattu 14.2.2013] Saatavissa:

[http://www.vvy.fi/files/385/eila\\_torvinen.pdf](http://www.vvy.fi/files/385/eila_torvinen.pdf)

Virta, A. 2011. *Biokaasutuotannon prosessit ja biokaasun tuotanto*. Turku: Turun ammattikorkeakoulu, Bio- ja elintarviketekniikka. Opinnäytetyö. [viitattu 20.2.2013]. Saatavissa:

[https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34331/Virta\\_Aleksi.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34331/Virta_Aleksi.pdf?sequence=1)

Ympäristöministeriö, 2012 a. *Ajankohtaista jätelain uudistuksesta* [verkkolehti]. [viitattu 23.2.2013].

Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=136252&lan=en>

Ympäristöministeriö, 2012 b. *Jätealan lainsäädännön uudistus päähkinänkuoressa* [kalvosarja]. [viitattu 23.2.2013]. Saatavissa: [http://www.ym.fi/fi-](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Ymparistonsuojelun_valmisteilla_oleva_lainsaadanto/Jatealan_lainsaadannon_kokonaisuudistus)

[FI/Ymparisto/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Ymparistonsuojelun\\_valmisteilla\\_oleva\\_lainsaadanto/Jatealan\\_lainsaadannon\\_kokonaisuudistus](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Ymparistonsuojelun_valmisteilla_oleva_lainsaadanto/Jatealan_lainsaadannon_kokonaisuudistus)

Yrityksen A www-sivut [viitattu 14.2.2013]

Yrityksen B www-sivut [viitattu 14.2.2013]

LIITE 1

TAULUKKO BIOKAASUPANOSKOKEIDEN SYÖTEMÄÄRISTÄ

Pullo nro	Syöte	Näyte 1 (g)	Näyte 2 (g)	Näyte 3 (g)	Ymppe (g)	Seoksen pH alussa
1.0	Ymppe	-	-	-	3496,17	7,85
1.1	Ymppe	-	-	-	3499,82	7,85
1.2	Ymppe	-	-	-	3500,40	7,85
2.0	Tehdas A prim.+bioliete	1554,30	1574,10	-	370,60	7,71
2.1	Tehdas A prim.+bioliete	1552,40	1571,20	-	375,73	7,68
2.2	Tehdas A prim.+bioliete	1550,10	1572,70	-	376,81	7,73
3.0	Tehdas A prim.+bioliete+biojäte	1068,00	1081,40	176,22	1173,40	7,53
3.1	Tehdas A prim.+bioliete+biojäte	1069,00	1080,60	176,00	1173,40	7,59
3.2	Tehdas A prim.+bioliete+biojäte	1068,90	1083,00	176,42	1173,00	7,58
4.0	Tehdas B prim.+bioliete	1529,00	1631,90	-	338,21	7,51
4.1	Tehdas B prim.+bioliete	1528,90	1633,90	-	336,71	7,16
4.2	Tehdas B prim.+bioliete	1529,30	1632,80	-	337,27	7,40
5.0	Tehdas B prim.+bioliete+biojäte	1052,10	1124,70	176,84	1146,70	7,25
5.1	Tehdas B prim.+bioliete+biojäte	1053,40	1124,50	176,24	1146,20	7,48
5.2	Tehdas B prim.+bioliete+biojäte	1051,70	1123,10	176,79	1149,40	7,56

LIITE 2

TAULUKKO JATKUVATOIMISEN BIOKAASULAITTEISTON SYÖTEMÄÄRISTÄ

SYÖTTÖMÄÄRÄT					Syöttö (g)	Syöttö (g)	Syöttö (g)
Syöte	TS-%	VS-%	VS/TS		Primääri	Bioliete	Ymppe
Ymppe	4,67	3,41	0,73				
Tehdas A Primääriliete	0,37	0,32	0,86	Reaktori 1-2	5485	5545	970,0
Tehdas A Bioliete	0,36	0,28	0,78	Reaktori 3-4	5398	5763	838,2
Tehdas B Primaariliete	0,62	0,38	0,61				
Tehdas B Bioliete	0,34	0,14	0,41				